

Faculté de génie

Département de génie civil

Les écoulements dans les milieux non saturés et leurs applications aux couvertures avec effet de barrière capillaire installées dans un site d'enfouissement sanitaire

Mémoire de maîtrise ès science appliquée

Spécialité : Géotechnique environnementale

Composition du jury :

Mourad Karray, Ph.D., ing., Dép. génie civil, Université de Sherbrooke
Serge-Étienne Parent, Ph.D., ing., Golder et Associés Ltée, Montréal
Alexandre Cabral, Ph.D., ing., Dép. génie civil, Université de Sherbrooke (Directeur de recherche)

Benoit LACROIX VACHON

Sherbrooke (Québec) Canada

Octobre 2008



Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-49520-9
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-49520-9



Résumé

Une parcelle expérimentale construite sur le site d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps a pour but d'évaluer l'efficacité d'une couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC). Cette dernière est constituée d'une couche de sous-produits de désencrage (SPD) jumelée à une barrière capillaire constituée d'une couche de sable sur une couche de gravier. Pour faire le suivi de la performance, les instruments suivants y ont été installés : lysimètres, tensiomètres, sondes de teneurs en eau, plaques de tassement et station météorologique. Afin d'étudier la validité de certains principes de conception retenus pour ce projet de recherche, ce recouvrement alternatif a été conçu de façon à ce que la longueur de transfert (LT) soit juste inférieure à la longueur disponible pour la construction de la CEBC, soit 30 mètres. De plus, la conception des lysimètres devait prendre en considération les choix de matériaux, car ces lysimètres devaient demeurer fonctionnels pendant toute la période de l'étude.

Des essais de laboratoire ont été réalisés dans le but de déterminer la courbe de rétention d'eau (CRE) des matériaux composant la barrière capillaire. Avec la CRE, on peut obtenir la fonction de conductivité hydraulique (FCH), qui est le principal élément de design de la CEBC et des lysimètres. Finalement, à partir des FCH, il est possible d'évaluer la LT théorique. L'utilisation des équations théoriques et des simulations numériques ont montré que la LT est très sensible aux paramètres qui décrivent la CRE et la FCH. Puisque la CRE a été obtenue selon différentes techniques – qui ont donné des résultats un peu différents – les LT obtenues ont sensiblement variées. Les données de terrain ont permis de mieux évaluer la LT et, ainsi, de préciser laquelle, parmi les CRE obtenues, était la plus proche de la réalité.

L'analyse des données du terrain montre que la conductivité hydraulique saturée, k_{sat}, des SPD diminue d'environ un ordre de grandeur entre 2006 et 2007, ce qui a pour conséquence de faire varier sa CRE et sa FCH. Le suivi de terrain montre aussi que la base de la barrière hydraulique demeure saturée et que l'apport d'eau à la barrière capillaire (sable sur gravier) augmente selon une progression relativement constante, au fur et à mesure qu'on se dirige de l'amont vers l'aval. L'analyse des succions mesurées au moyen des tensiomètres et des quantités d'eau recueillies par les lysimètres, jugées fiables, permet de conclure que la LT varie entre 24 mètres et 29 mètres en 2006 et, à certains moments en 2007, elle est plus élevée

que les 30 mètres de la cellule expérimentale. En tout temps, le débit qui percole verticalement dans le gravier à l'extrémité aval de la CEBC est inférieur à 3,0 x 10-9 m/s, c'est-à-dire inférieur aux normes les plus restrictives de conception de recouvrements dits imperméables (Règlement québécois sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelles). L'objectif du recouvrement alternatif, qui est de dévier le débit de percolation du design sur 30 mètres pour éviter l'entrée d'eau dans les déchets, est donc atteint avec le design proposé.

Une simulation a été réalisée avec le logiciel Visual HELP, pour quantifier l'apport d'eau arrivant à la frontière entre les SPD et la couche de sable. Avec cet apport d'eau, différentes simulations ont été réalisées avec les logiciels SEEP/W et Hydrus, afin de vérifier si les critères de design s'avéraient exacts. Ces modélisations montrent que la conception initiale est somme toute assez pertinente, car les mêmes LT observées sur le terrain sont obtenues par simulation numérique. Les simulations nous indiquent aussi qu'un recouvrement alternatif comme celui proposé pourrait permettre d'atteindre des LT beaucoup plus élevées, dépendamment des propriétés hydrauliques de la couche de rétention capillaire (CRC).

Mots clés

Barrière capillaire - Barrière hydraulique - Site d'enfouissement sanitaire - Imperméabilisation - Sous-produit de désencrage - Valorisation

Abstract

An experimental cell was built over the Saint-Tite-des-Caps landfill in order to evaluate the efficiency of a cover with capillary barrier effect (CCBE). The latter is composed of a layer of deinking by-products (DBP) installed over a capillary barrier, which is in turn composed of a layer of coarse sand over a layer of gravel. In order to monitor the performance of this system, lysimeters, tensiometers, water content probes, settlement plates and weather station were installed. Design parameters were selected in such a way that the diversion length (DL) would be attained right before the length of the CCBE (30 m). As for the design of the cell itself, the design of the lysimeters also depended on the unsaturated properties of the materials employed, in particular their hydraulic conductivity functions. The lysimeters were designed in order to remain functional at least during the study period.

The water retention curves (WRC) of the materials composing the CCBE were determined in the laboratory. These results allowed obtaining the hydraulic conductivity functions (k-fct), which is the principal element, as far as optimisation of the design of the CCBE and of the lysimeters are concerned. Using the k-fcts, it is possible to evaluate the theoretical DL. Numerical simulations showed that the DL can be significantly altered by slight changes in the parameters used to describe the WRC and the k-fcts. For each material, the WRC was determined using various experimental methods; and they all gave slightly different parameters. This caused the significant variation in the DL. The DL determined based on field data allowed for the selection of the most representative WRC.

Analysis of field data, made it possible to show the change in saturated hydraulic conductivity, k_{sat}, of DBP decreased by nearly one order of magnitude, which affected its WRC and k-fct. Field monitoring also shows that the hydraulic barrier remains saturated and that the volume of water reaching the sand/gravel capillary barrier increased progressively, as one moves downslope. Data from the four tensiometers, placed along the sand/gravel interface, and the measured infiltration rates in the 3 lysimeters installed in the gravel layer show that the DL varied between 24 m and 29 m during the 2006 monitoring period. During some short periods in 2007, the DL was greater than the 30 m of the cell.

The infiltration rate into the gravel layer at the toe of the slope was continuously lower than 3,0 x 10^{-9} m/s, i.e. lower than the more stringent standards of low permeability cover design (*Règlement québécois sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelle*s).

In order to quantify the amount of infiltrating water trough DBP and sand layers, several simulations were performed using by Visual HELP software. Infiltrations rates obtained thereof were used as boundary conditions in steady state simulations of the response of the capillary barrier system. Software SEEP/W and Hydrus were used in these simulations and allowed to check the exactness of the initial design hypotheses and assumptions. As the measured DL is somehow similar to the simulated DL, it was concluded that the design methodology was appropriate. The simulations results also show that much greater DL can be attained using such an alternative cover system, depending on the hydraulic properties of the materials.

Keywords

Capillary barrier – Deinking by-products – Hydraulic barrier – Sanitary landfill – Surface sealing – Valorization

Remerciements

Ce mémoire de maîtrise n'aurait pu être accompli sans l'aide de certaines personnes. Ainsi, je tiens à remercier :

Mon directeur de recherche, Alexandre Cabral (professeur titulaire, département de génie civil, Université de Sherbrooke) pour son aide précieuse, son soutien, mais surtout sa disponibilité.

Jean-Guy Lemelin (technicien au laboratoire de mécanique des sols de l'Université de Sherbrooke) pour ses grandes connaissances pratiques et ses conseils indispensables sur le terrain et en laboratoire.

Le groupe de recherche de géoenvironnement de l'Université de Sherbrooke, pour l'aide apportée sur le terrain et au laboratoire, et plus particulièrement Amir Massood Abdolahzadeh, avec qui j'ai partagé une partie du travail réalisé.

Greg Newman, ingénieur senior chez Geo-slope international, pour ses conseils sur la modélisation.

Le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ainsi que Cascades Groupe Tissu, Cascades Groupe Papiers Fins et Ferti-Val Inc. pour leur soutien financier au projet.

Finalement, je tiens à remercier ma fiancée Céline, ma famille, mes amis pour leur amitié et leur amour et mes professeurs pour leur soutien, chacun à leur manière.

Table des matières

1 Introduction 1
1.1 Problématique et contexte du projet 1
1.2 Objectifs du projet et aperçu des résultantes 2
1.3 Structure du mémoire 4
2 État des connaissances 6
2.1 Relations de phase dans les sols non saturés 6
2.2 Potentiel hydraulique dans les sols non saturés 7
2.3 Caractéristiques hydrauliques des sols non saturés : la courbe de rétention d'eau 9
2.3.1 Description de la courbe de rétention d'eau 9
2.3.2 Facteurs influençant la CRE 10
2.3.3 Modèle de CRE 11
2.3.4 Prédiction de la CRE 12
2.3.5 Approche expérimentale pour l'obtention de la CRE 14
2.4 Caractéristiques hydrauliques des sols non saturés : la fonction de conductivité hydraulique 15
2.4.1 Description de la fonction de conductivité hydraulique 15
2.4.2 Facteur influençant la fonction de conductivité hydraulique 15
2.4.3 Modèles de FCH 16
2.5 Écoulements non saturés et modélisations 17
2.6 Barrière capillaire : une application des principes d'écoulement non saturés 19
2.6.1 Théorie des barrières capillaires inclinées 19
2.6.2 Performance et limites des CEBC 24
2.6.3 Instrumentation des CEBC 25
2.6.4 Composantes d'une CEBC 26
2.6.5 Réglementation québécoise 28
3 Approche et méthodologie 29
3.1 Recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps 31
3.1.1 Localisation 31
3.1.2 Plans du recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps 31
3.1.3 Lieu d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps 33
3.1.4 Composition du recouvrement alternatif 35
3.1.5 Conception du recouvrement alternatif 36
3.1.6 Instrumentation sur le terrain 46
3.2 Laboratoire 54
3.2.1 Granulométrie 54
3.2.2 Essais de colonne 55
3.2.3 Essai de table de tension 58
3.3 Logiciels de modélisation 59
3.3.1 Visual HELP 59
3.3.2 SEEP/W 59
3.3.3 Hydrus 3D 60
4 Approche et méthodologie 61
4.1 Caractérisation des matériaux 63
4.1.1 Courbes de rétention d'eau (CRE) 63
4.1.2 Fonctions de conductivité hydraulique (FCH) 65
4.1.3 Comportement théorique du recouvrement alternatif, selon la caractérisation des matériaux 67
4.2 Suivi du comportement du recouvrement alternatif 68
4.2.1 Données météorologiques 68
4.2.2 Suivi de la performance de la barrière hydraulique (SPD) 69
4.2.3 Suivi de l'évolution des propriétés hydrauliques de la barrière hydraulique 73
4.2.4 Suivi de la performance de la barrière capillaire 76
4.2.5 Synthèses des résultats et discussion 90
4.3 Modélisation du recouvrement alternatif 93
4.3.1 Débit arrivant à la barrière capillaire 93
4.3.2 Élaboration du modèle sur Hydrus et SEEP/W : la barrière capillaire 95

4.3.3 Évaluation de la longueur de transfert en régime permanent 100
4.3.4 Évaluation de la longueur de transfert, en état transitoire 102
4.3.5 Synthèses des résultats : efficacité modélisée du recouvrement alternatif 103
5 Discussions sur le *design* proposé en 2005 : révision selon les résultats observés et modélisés 104
5.1 *Design* des lysimètres 104
5.2 Choix et épaisseurs des matériaux 105
5.2.1 Couche de SPD 106
5.2.2 Gravier 106
5.2.3 Sable 107
5.3 Sommaire de la révision du *design* 107
6 Conclusions 108
Bibliographie 111
Annexes 121
A. Cône de sable effectué sur le terrain 122
B. Sommaire de la position et du code de l'instrumentation sur le terrain 123
C. Caractéristiques des équipements de terrain 124
D. Conversion de succions mesurées à l'aide des DL6 en kPa 125
E. Correction de la calibration de l'Irromètre automatique no 4 126
F. Calibration des sondes de teneur en eau ECH20, pour le SPD 127
G. Fiches techniques des lysimètres INSTALLÉS dans le recouvrement alternatif 128
H. Mode opératoire pour les essais Colonne 129
I. Mode opératoire pour les essais Table de succion 130
J. Caractérisation de la pierre poreuse, UTILISÉE dans l'essai Table de succion 131
K. Code Scilab pour Arya Paris (1999) 132
L. Granulométrie réalisée sur le gravier, lors de la construction 134
M. Code MatLab pour le calcul des longueurs de transfert, selon Ross (1990) 135
N. Rapport de modélisation VISUAL HELP 136
O. Points expérimentaux de Parent et Cabral 2006 138

Table des figures

Figure 1-1 - Contexte du recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps 3
Figure 2-1 - Diagramme des phases 6
Figure 2-2 - CRE : allure générale 10
Figure 2-3 - Schématisation de l'écoulement dans un sol granulaire non saturé 15
Figure 2-4 - Profils de degré de saturation et de succion dans une barrière capillaire 20
Figure 2-5 - Barrière capillaire (a) problématique (b) horizontale et (c) inclinée 21
Figure 2-6 a) - Lysimètre ayant une hauteur suffisante pour en assurer l'efficacité b) Lysimètre n'ayant pas une hauteur suffisante pour en assurer l'efficacité 26
Figure 2-7 - Composantes d'une couverture 27
Figure 2-8 - Détails de l'article 50 du projet de règlement sur l'élimination des matières résiduelles 28
Figure 3-1 - Organigramme de la démarche scientifique du projet 30
Figure 3-2 - Localisation du site expérimental, à Saint-Tite-des-Caps 31
Figure 3-3 - Vues en plan et en coupe de la cellule expérimentale de Saint-Tite-des-Caps 32
Figure 3-4 - L'environnement de la cellule expérimentale de Saint-Tite-des-Caps 33
Figure 3-5 - Débits de biogaz et de méthane (CH_4) brûlés à la torchère 34
Figure 3-6 - Dispositif de montage pour l'essai de laboratoire 37
Figure 3-7 - CRE du SPD obtenue au laboratoire et lissée par le modèle de van Genuchten (1980) 37
Figure 3-8 - FCH du SPD obtenue à l'aide de la CRE et du modèle de van Genuchten (1980) 38
Figure 3-9 - CRE du sable Classe A (UNSODA et (Fredlund et Xing 1994)) et du sable ST (UNSODA) 40
Figure 3-10 - FCH du sable classe A (UNSODA et van Genuchten (1980)) et du sable ST (UNSODA, avec extrapolation) 40
Figure 3-11 - Fuseau approximatif pour le gravier selon les critères des filtres, gravier Ladufo à l'étude 42
Figure 3-12 - Simulation numérique de la LT à partir de plusieurs valeurs d'infiltration 43
Figure 3-13 - Simulation numérique de la longueur de transfert en fonction de l'épaisseur de la CRC 44
Figure 3-14 - Profils de succion dans le gravier (Kisch, 1959) 45
Figure 3-15 - Schéma d'un tensiomètre T4 installé dans le recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps 46
Figure 3-16 - Un des Irromètres automatiques installés dans le recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps 48
Figure 3-17 - Irromètre mécanique utilisé à Saint-Tite-des-Caps 48
Figure 3-18 - Représentation d'une sonde de teneur en eau ECH20 utilisée à Saint-Tite-des-Caps 49
Figure 3-19 - Installation des lysimètres dans le sable et dans le gravier 51
Figure 3-20 - Section transversale montrant les vecteurs d'écoulement et les iso-contours de pression (kPa) : (a) Lysimètre de 0,40 mètre (semaine sèche); (b) Lysimètre de 0,60 mètre (semaine sèche); (c) Lysimètre de 0,40 mètre (condition typique - 85 % du temps); (d) Lysimètre de 0,60 mètre (condition typique, 85 % du temps) 51
Figure 3-21 - Schéma des plaques de tassement à Saint-Tite-des-Caps 53
Figure 3-22 - Infiltromètre de type Mini Disk (a) essai en laboratoire (b) essai sur le terrain 54
Figure 3-23 - Analyses granulométriques sur le sable classe A 55
Figure 3-24 - Essai de colonne pour l'obtention d'une CRE 56
Figure 3-25 - CRE sable classe A, données expérimentales, banque de données UNSODA et régressions 57
Figure 3-26 - CRE gravier, données expérimentales, banque de données UNSODA et régressions 57
Figure 3-27 - Montage de l'essai : table de succion, échantillon et erlenmeyer 58
Figure 4-1 - Structure de la présentation des résultats 62
Figure 4-2 - FCH du sable classe A, pour différents essais expérimentaux ainsi que pour les données d'UNSODA 66
Figure 4-3 - FCH du gravier pour la CRE retenue et pour la CRE estimée lors de la conception (UNSODA) 66
Figure 4-4 - Analyse des LT théoriques (Ross, 1990), en fonction du débit de sollicitation 67
Figure 4-5 - Précipitations au site d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps, 2006 et 2007, données de la station météorologique installée près de la cellule 68
Figure 4-6 - Variation temporelle de la teneur en eau volumétrique du SPD, profil A 71
Figure 4-7 - Variation temporelle de la teneur en eau volumétrique du SPD, profil B 71
Figure 4-8 - Variation temporelle de la teneur en eau volumétrique du SPD, profil C 72
Figure 4-9 - Succion matricielle du SPD 72
Figure 4-10 - CRE observé sur le terrain, 2006 et 2007 73

Figure 4-11 – Tassement mesurée par les plaques de tassement installées dans le SPD 75
Figure 4-12 - Variation temporelle de la succion à l'interface SPD-BC, 2006 78
Figure 4-13 - Variation temporelle de la succion à l'interface SPD-BC, 2007 78
Figure 4-14 - Mesures des tensiomètres T4 sur deux années, interface sable-gravier 81
Figure 4-15 - Analyse spatiale de la succion à l'interface CRC-CBC 82
Figure 4-16 - Mesures des Irromètres en 2007, interface sable-gravier 83
Figure 4-17 - Succions mesurées en bas et en haut (à l'intérieur et à l'extérieur) du lysimètre sable 2 85
Figure 4-18 - Simulation de l'efficacité d'un lysimètre dans le sable, en considérant les succions sur le terrain.. 87
Figure 4-19 - Analyse spatiale des débits annuels moyens de percolation dans le gravier, 2006 et 2007 89
Figure 4-20 - Sommaire des écoulements observés sur le terrain, cellule expérimentale 92
Figure 4-21 - Modélisation sur Visual HELP, débit percolant le SPD, atteignant CRC, k_{sat} SPD=$1x10^{-8}$ m/s 94
Figure 4-22 - Modèle retenu sur Hydrus 95
Figure 4-23 - Modèle retenu sur SEEP/W 96
Figure 4-24 - LT modélisées sur SEEP/W et sur Hydrus et LT théorique (Ross, 1990), pour différents débits, et pour différentes propriétés des matériaux 101
Figure 4-25 - Simulation numérique typique sur Hydrus 102
Figure 4-26 - Simulation numérique typique sur SEEP/W 102
Figure 5-1 - Succion maximale développée dans le sable, à partir des différentes FCH du sable classe A 105
Figure 5-2 - Profil de succion dans le gravier, avec propriétés évaluées en laboratoire 107

Table des tableaux

Tableau 2-1 – Variation des paramètres de la CRE (φ_{VEA} et λ) en fonction de la granulométrie et de la compaction 11
Tableau 2-2 - Modèles de CRE 11
Tableau 2-3 - Modèles de FCH 16
Tableau 3-1 - Caractérisation des déchets reçus au site d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps 34
Tableau 3-2 - Sommaire des instruments et de leurs fonctions 47
Tableau 4-1 – Estimation de la variation de la conductivité hydraulique saturée du SPD dans le temps avec le tassement 75
Tableau 4-2 - Mesures de la conductivité hydraulique saturée du SPD avec l'infiltromètre Mini-Disk 76
Tableau 4-3 - Débits récoltés aux lysimètres installés dans la CRC et la CBC, 2006 et 2007 89
Tableau 4-4 - Trois scénarios de maillage et de tolérance étudiés pour le modèle sur Hydrus 98
Tableau 4-5 - Étude de la sensibilité du modèle d'Hydrus aux différents scénarios : maillage et tolérance 98
Tableau 4-6 - Quatre scénarios de maillage et de tolérance étudiés pour le modèle sur SEEP/W 99
Tableau 4-7 - Étude de la sensibilité du modèle sur SEEP/W aux différents scénarios de maillage et de tolérance 99

Liste des acronymes

BC : Barrière capillaire

CEBC : Couverture avec effet de barrière capillaire

CH_4 : Méthane

CRE : La courbe de rétention d'eau

CRC : Couche de rétention capillaire

CBC : Couche de bris capillaire

FCH : Fonction de conductivité hydraulique

GES : Gaz à effet de serre

LT : Longueur de transfert

LET : Lieu d'enfouissement technique

SPD : Sous-produits de désencrage

VEA : Valeur d'entrée d'air

VEE : Valeur d'entrée d'eau

Liste des symboles

θ : Teneur en eau volumétrique

ω : Teneur en eau massique ou gravimétrique

φ : Succion régnant dans un matériau poreux

φ_C : Succion au sommet d'une couche de sable

ρ_d : Masse volumique sèche

e : Indice des vides

n : Porosité

θ_{sat} : Teneur en eau volumique à saturation

φ_{VEA} : Succion associée à la valeur d'entrée d'air

φ_{VEE} : Succion associée à la valeur d'entrée d'eau

λ : Pente de désaturation (λ) de la CRE

h_p : Hauteur d'eau (exprimée en mètre) correspondante à une énergie de pression

k_{sat} : Conductivité hydraulique saturée

α : L'inverse de la valeur d'entrée d'air, pour le modèle de van Genuchten (1980), 1/kPa

1 INTRODUCTION

1.1 Problématique et contexte du projet

Malgré les efforts de recyclage, la quantité de déchets enfouis au Québec entre 1994 et 2004 a augmenté de 29,2 % (Recyc-Québec, 2006). L'augmentation des quantités de matières envoyées dans les lieux d'enfouissement entraîne son lot de problèmes, comme, entre autres, la génération de lixiviat et de gaz à effet de serre.

Les biogaz d'un site d'enfouissement ont tendance à s'échapper à travers le recouvrement du site. Afin de les récupérer pour les brûler ou pour produire de l'énergie, les sites modernes sont équipés de systèmes de captage des biogaz (Gouvernement du Canada, 2002). Actuellement, seulement 25 % des sites canadiens sont dotés d'un tel système. Dans la majorité des cas, ce sont des systèmes classiques dont l'efficacité de récupération ne dépasserait pas les 40 à 60 % (Humer et Lechner, 1999). Les systèmes de récupération les plus performants laissent échapper, en moyenne, 25 % des biogaz produits (USEPA, 2002). Les gaz à effet de serre (GES) qui s'échappent constituent des *émissions fugitives*, qui contribuent au réchauffement planétaire. Les émissions de méthane (CH_4) provenant des sites d'enfouissements représentent environ 5 à 6 % des émissions mondiales de GES et au moins 3 % des émissions de GES du Canada (Cabral, 2006). À l'échelle municipale, ces proportions peuvent augmenter. En effet, 74 % des émissions de GES de la ville de Sherbrooke proviennent du méthane non brûlé de son lieu d'enfouissement sanitaire (Québec MUNICIPAL, 19 mars 2008).

Quant au lixiviat, mélange d'eau et de solides dissous, il est produit lorsque l'eau passe à travers les déchets et s'accumule au fond du site d'enfouissement. La composition exacte du lixiviat dépend du type de déchets et de leur état de décomposition, mais le lixiviat peut contenir une variété de composants toxiques et polluants, en quantités importantes ou infimes. S'il est mal géré, le lixiviat peut percoler et contaminer les eaux souterraines et les eaux de surface.

Des recouvrements à faible perméabilité, comme des couvertures avec effet de barrière capillaire (CEBC) ou des barrières hydrauliques, peuvent aider à atténuer les problèmes d'émission de GES et de production de lixiviat. La combinaison de ces deux derniers recouvrements peut offrir un recouvrement alternatif encore plus efficace pour limiter les infiltrations d'eau (Parent et Cabral, 2006a).

Dans ce contexte, un recouvrement alternatif a été construit sur une section du lieu d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps. Ce recouvrement est composé d'une barrière capillaire constituée de matériaux granulaires (sable, gravier) au-dessus de laquelle se retrouve une couche de sous-produits de désencrage (SPD) de papier, utilisée comme une barrière hydraulique. Le SPD, provenant du processus de recyclage du papier, est ainsi dévié de l'enfouissement.

La Figure 1-1 suivante présente le contexte dans lequel s'insère le recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps. Les cases gris foncé présentent le cas précis du recouvrement alternatif.

1.2 Objectifs du projet et aperçu des résultantes

Le présent mémoire s'insère dans un projet plus vaste, du groupe de recherche en géoenvironnement, ayant pour but d'atténuer les effets néfastes du lixiviat et du méthane sur l'environnement sous trois aspects :

- Diminuer la production de déchets en valorisant un sous-produit industriel
- Augmenter l'efficacité de la collecte des biogaz
- Diminuer la quantité d'eau percolant à travers les déchets d'un site d'enfouissement

Le projet dont il est question ici a pour objectif principal d'analyser le troisième aspect du projet global.

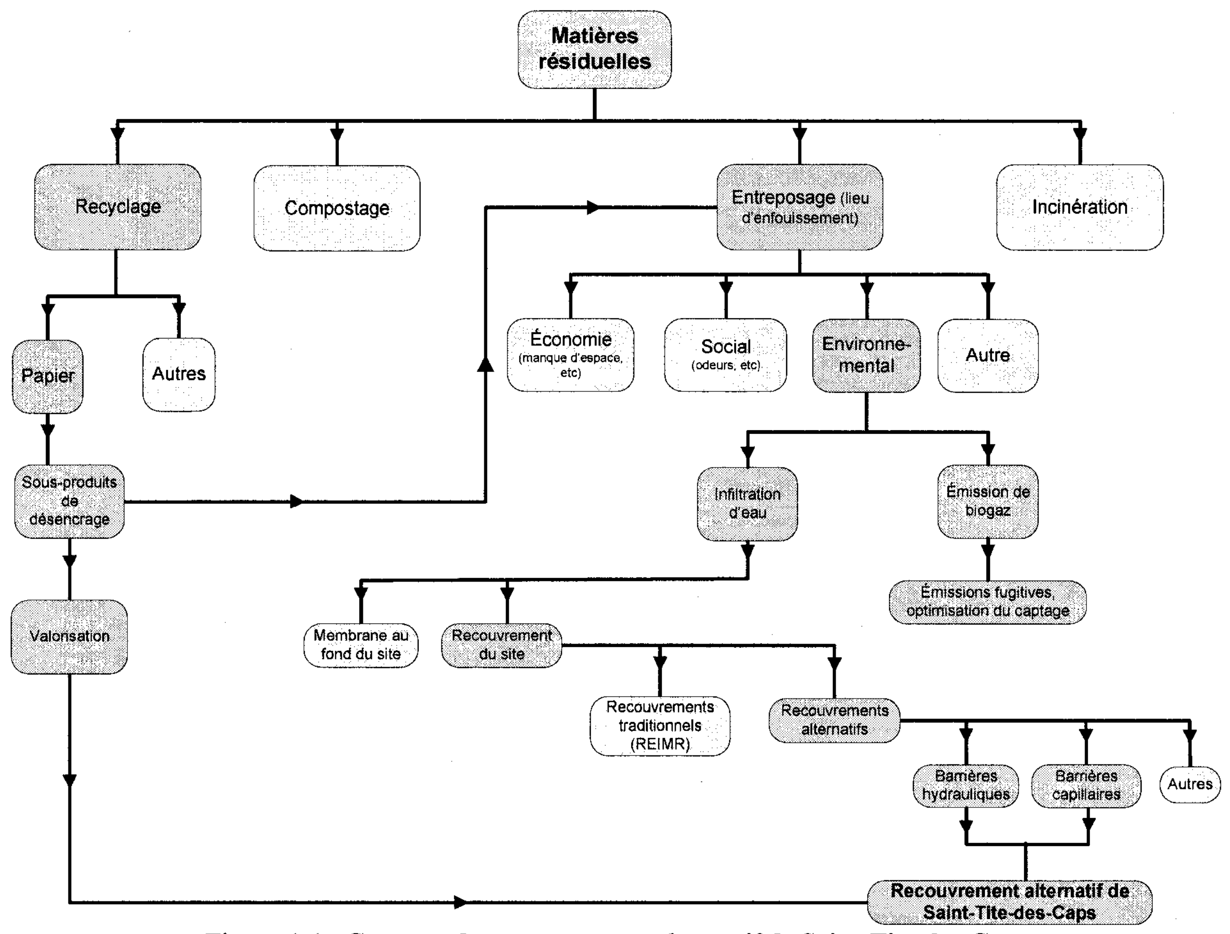


Figure 1-1 - Contexte du recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps

Objectif principal : évaluer l'efficacité du recouvrement alternatif proposé en termes d'infiltration d'eau.

Il est important de noter que le deuxième aspect, touchant les biogaz, fait l'objet du travail d'un collègue.

Cette évaluation de la performance se fera en trois volets :

1. Les résultats de terrain permettent d'étudier et de quantifier l'infiltration de l'eau observée dans le recouvrement alternatif.
2. Des essais en laboratoire permettent d'obtenir les propriétés hydrauliques des matériaux composant le recouvrement alternatif; propriétés nécessaires à la modélisation et à une bonne analyse des résultats sur le terrain.

3. Des modélisations numériques du recouvrement alternatif proposé permettent d'analyser sa performance, pour différents débits et différentes propriétés hydrauliques des sols.

De plus, le présent projet a comme sous-objectif l'étude de la variation dans le temps des propriétés hydrauliques des matériaux composant le recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps. L'accomplissement de ce sous-objectif est nécessaire pour répondre à l'objectif principal soit, plus précisément, pour évaluer l'efficacité du recouvrement alternatif sur le terrain.

Finalement, un objectif secondaire est aussi posé, soit d'établir une revue du *design* du recouvrement alternatif proposé, selon les caractéristiques et les données accumulées, depuis deux ans, en laboratoire et sur le terrain.

Pour effectuer cette étude, certaines hypothèses ont dû être posées :

1. Le recouvrement alternatif proposé est aussi efficace, sinon davantage, pour dévier l'eau qu'un recouvrement conventionnel.
2. Ce recouvrement alternatif sera encore plus performant avec une barrière hydraulique; les SPD sont des matériaux formant une bonne barrière hydraulique.
3. La méthode de *design* retenue lors de la conception est raisonnable pour atteindre les LT souhaitées.

1.3 Structure du mémoire

Pour vérifier les hypothèses posées à la section 1.2, ce présent mémoire sera structuré comme suit :

- Le chapitre 2 fait l'état des connaissances sur les écoulements des eaux dans un milieu poreux non saturé, comme les sols, et sur les recouvrements à effet de barrière capillaire.
- Le chapitre 3 concerne la présentation du site expérimental, le choix des matériaux et des équipements; les montages utilisés en laboratoire ainsi que les logiciels de simulations numériques utilisés dans le cadre de ce projet.

- Le chapitre 4 présente, pour répondre à l'objectif principal, une analyse du comportement du recouvrement alternatif proposé en fonction des données expérimentales obtenues en laboratoire, *in situ* et par modélisations numériques.
- Le chapitre 5 effectue une revue du *design* du recouvrement alternatif proposé, dans le but de répondre à l'objectif secondaire.
- Une conclusion permet de revoir succinctement les principaux résultats de ce travail ainsi que les futurs travaux envisageables pour poursuivre la lignée de ce projet de maîtrise.

2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce chapitre présente une revue de la littérature reliée au projet : relations de phase et potentiel hydraulique dans les sols non saturés, les caractéristiques hydrauliques des sols non saturés, les écoulements dans ces sols et le phénomène de barrière capillaire.

2.1 Relations de phase dans les sols non saturés

Un milieu poreux est un domaine dans lequel on retrouve une matrice solide à l'intérieure de laquelle se trouvent des vides : les pores. Un sol est un exemple de milieu poreux. Un milieu poreux est dit partiellement saturé lorsque les pores ne sont pas complètement remplis d'eau. Dans ce cas, cette saturation partielle du sol se caractérise par la présence de trois phases distinctes : une phase solide (la matrice du sol), une phase liquide (eau) et une phase gazeuse (air), tel que montré à la La Figure 2-1.

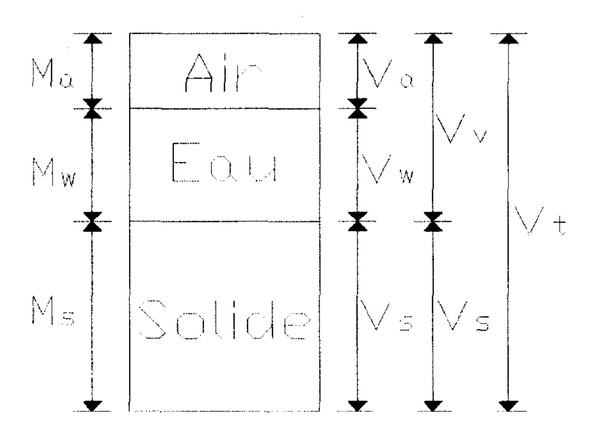


Figure 2-1 - Diagramme des phases

Différents indices sont utilisés pour exprimer la proportion d'une phase par rapport à une autre, en terme de quantité présente dans le milieu poreux.paramètres définissent ces phases. La teneur en eau gravimétrique, ω, est définie comme la masse d'eau, M_w, divisée par la masse de solide, M_s. La teneur en eau volumétrique, θ, est définie comme le volume d'eau dans les pores, V_w, divisé par le volume total du sol, V_T. Ces proportions sont liées ensemble par la densité sèche du sol, ρ_d et par la densité de l'eau, ρ_w. La porosité, n, est le ratio du volume des vides, V_v, sur le V_T. La porosité est connexe à l'indice des vides, e, qui est le

volume des vides divisé par le volume des solides, V_T. Le degré de saturation, *Sr*, est égal au rapport du volume d'eau sur le volume des vides (Holtz et Kovacs, 1991). La Figure 2-1 présente ces différentes variables.

La teneur en eau volumétrique est typiquement utilisée pour quantifier le changement dans la quantité d'eau emmagasinée d'un milieu poreux. Cependant, cette technique ne peut être utilisée que pour les milieux poreux rigides, c'est-à-dire un matériau qui ne se compactera pas dans le temps. En effet, la teneur en eau volumétrique est dépendante du volume des vides et n'est donc pas adéquate pour décrire pleinement la variation de la teneur en eau d'un échantillon compressible. Dans ce dernier cas, il est préférable d'utiliser la teneur en eau gravimétrique, soit une variable indépendante aux changements du volume (McCartney, 2007).

2.2 Potentiel hydraulique dans les sols non saturés

Pour bien comprendre les propriétés des sols insaturés, il faut connaître l'état d'énergie de l'eau dans les pores. Darcy (1856) a montré que pour un écoulement laminaire vertical à travers un sol le débit varie en fonction du gradient hydraulique, i.

$$Q = -\frac{K}{g}\frac{d\Phi}{dz}A = -KiA$$ **Équation 2-1**

Le terme *K* représente la conductivité hydraulique; *g*, la constante gravitationnelle; *A*, l'aire de la section perpendiculaire à l'écoulement traversé par le débit; *z*, la distance verticale à partir d'une référence spécifique choisie; Φ, l'énergie hydraulique totale par masse unitaire et *i*, le gradient hydraulique. La valeur de Φ peut être donnée par une forme modifiée de l'équation de Bernouilli (Holtz et Kovacs, 1991):

$$\Phi = gz + \frac{1}{2}\left(\frac{v}{n}\right)^2 + \frac{P_O}{\rho_W} + \frac{P_W}{\rho_W}$$ **Équation 2-2**

Le terme *v* représente est la vitesse effective, égale à *Q/A*, P_o, la pression osmotique, P_w, la pression d'eau. Le terme *v/n* réfère à la vitesse d'écoulement et reflète l'augmentation locale

de la vitesse effective autour des particules. Dans l'Équation 2-2, les termes du membre de droite réfèrent, respectivement de gauche à droite, à l'énergie potentielle, à l'énergie cinétique, à l'énergie osmotique et à l'énergie causée par la pression d'eau. Selon McCartney (2007), pour un sol assez fin, près de l'équilibre thermodynamique, l'énergie osmotique et celle causée par la pression d'eau peuvent devenir négligeables.

Dans les sols non saturés, l'eau est maintenue dans les pores par la succion matricielle, φ, qui peut être engendrée par une combinaison d'adsorption et de pression capillaire (Olson et Langfelder, 1965). L'adsorption peut avoir comme origine les champs électriques (comme dans le cas des argiles) ou les forces de van der Waals. Essentiellement, la pression capillaire résulte des forces d'attraction inégales entre les molécules qui se trouvent à l'interface des matériaux en présence (Holtz et Kovacs, 1991). La succion matricielle peut être quantifiée par l'équation suivante, lorsque la pression dans la phase des vides est posée comme égale à la pression atmosphérique (Fredlund et Xing, 1993).

$$\varphi = P_a - P_w = -P_w$$ **Équation 2-3**

Le terme P_a représente la pression de l'air et P_w, la pression de l'eau. En utilisant l'Équation 2-2 et l'Équation 2-3 et en négligeant la pression osmotique et l'énergie cinétique, le potentiel hydraulique peut s'écrire de cette façon :

$$h = \frac{\Phi}{g} = z - \frac{\varphi}{\rho_w g}$$ **Équation 2-4**

Le terme h représente la charge totale; z, la charge d'élévation et $\varphi/(\rho_w g)$, la charge de succion. L'Équation 2-1 peut alors s'écrire de cette façon :

$$Q = -k \frac{dh}{dz} A$$ **Équation 2-5**

Enfin, le concept de débit unitaire ou de vitesse d'écoulement, q, est souvent utilisé :

$$Q = -k \frac{dh}{dz}$$ **Équation 2-6**

2.3 Caractéristiques hydrauliques des sols non saturés : la courbe de rétention d'eau

2.3.1 Description de la courbe de rétention d'eau

Pour un matériau poreux donné, la courbe de rétention d'eau (CRE) décrit la relation entre un indice de sa teneur en eau (on utilise souvent la teneur en eau volumique) et sa succion. La courbe de rétention d'eau est donc une caractéristique d'un matériau poreux donné.

Une CRE peut aussi montrer une différence si elle est obtenue par un essai de désaturation ou par un essai de saturation, un phénomène désigné sous le nom de l'hystérèse. Selon Smith et Mullins (2001), ceci est causé par l'irrégularité de la géométrie des pores, à l'angle de contact entre l'eau et les pores, qui est différent lors du séchage et du mouillage ainsi qu'aux variations de volume. Poulovassilis (1962) et Topp et Miller (1966) fournissent une autre explication : durant le séchage, en partant de l'état de saturation, les pores les plus larges sont drainés en premiers, suivis des plus petits pores. La situation inverse se produit lorsqu'on commence à partir de l'état sec. La Figure 2-2 permet de visualiser une CRE et ses différentes caractéristiques).

Cette courbe est normalement constituée de 3 phases successives :

- Une première phase (I), où la teneur en eau reste constante, à la teneur en eau de saturation (θ_s), malgré la succion appliquée.
- Une deuxième phase (II), où la teneur en eau diminue sous l'effet de la succion croissante. C'est la phase de désaturation.
- Une troisième phase (III), où l'on atteint un point à partir duquel il y a peu de changement de la teneur en eau avec l'augmentation de la succion. Ce point, indiqué à la Figure 2-2, représente la teneur en eau résiduelle (θ_r).

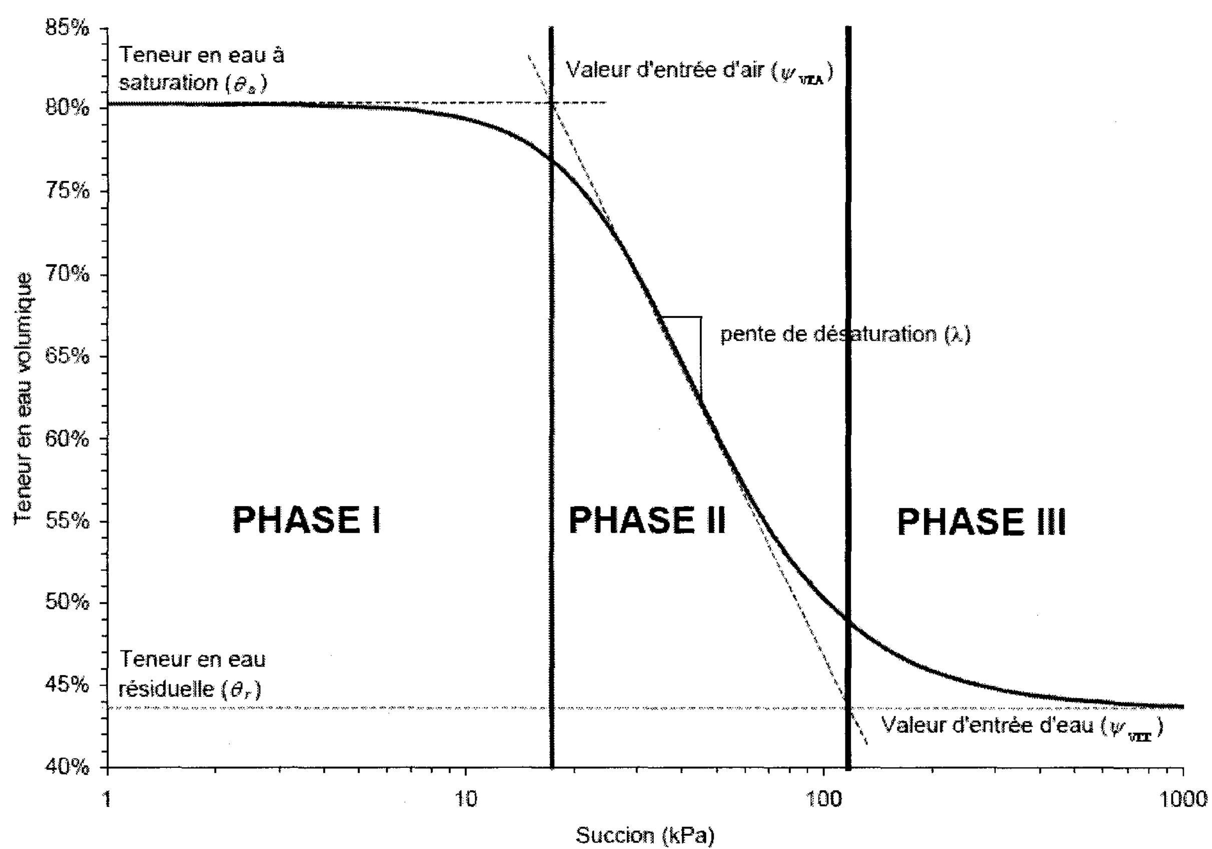


Figure 2-2 - CRE : allure générale (tiré de Parent, 2003))

Notons que θ_S est le terme utilisé pour décrire la teneur en eau volumique à saturation et φ_{VEA} est la valeur d'entrée d'air, soit la succion à partir de laquelle la désaturation du matériau poreux est considérable. Cette valeur marque le début de la phase II : l'eau commence à sortir des pores et à se faire remplacer par la phase gazeuse. Enfin, λ est le terme utilisé pour décrire la pente de désaturation exprimant la diminution de la teneur en eau avec l'augmentation de la succion. Ce sont les valeurs d'entrée d'air, φ_{VEA}, ainsi que la pente, λ, qui changent d'un matériau poreux à l'autre, en fonction de la distribution des pores du matériau.

2.3.2 Facteurs influençant la CRE

Les facteurs qui jouent un rôle sur l'allure des CRE sont essentiellement la granulométrie, mais aussi la compaction (McCartney, 2007). Une granulométrie grossière maximisera λ et minimisera φ_{VEA}; une granulométrie uniforme maximisera λ et un indice des vides élevé minimisera φ_{VEA} et maximisera λ, voir le Tableau 2-1.

Tableau 2-1 – Variation des paramètres de la CRE (φ_{VEA} et λ) en fonction de la granulométrie et de la compaction

		φ_{VEA}	λ
granulométrie	grossière	-	+
	fine	+	-
	étendue		-
	uniforme		+
n	élevée	-	+
	faible	+	-

Note: le signe + réfère à une augmentation et le signe -, à une diminution

McCartney (2007) énumère quelques autres facteurs qui influencent la CRE : la minéralogie, la structure, les macros-failles, la composition chimique du sol, le pH du sol, le fluide des pores, la température, les cycles de gel-dégel, le changement de volume de l'échantillon durant l'infiltration de l'eau.

2.3.3 Modèle de CRE

Il peut être pratique d'estimer la CRE comme une fonction continue. Le Tableau 2-2 résume ces différents modèles de CRE : Gardner (1958), Brooks et Corey (1964), van Genuchten (1980), Fredlund et Xing (1994). Ces modèles permettent aussi de lisser la CRE, à partir de données expérimentales (voir la sous-section 2.3.5).

Tableau 2-2 - Modèles de CRE

Équations	Auteurs
$S_e = \dfrac{1}{1 + a\varphi^n}$	Gardner (1958)
$S_e = \left(\dfrac{\varphi_{vea}}{\varphi}\right)^n$	Brooks & Corey (1964)
$S_e = \left(\dfrac{1}{1 + (\alpha\varphi)^n}\right)^m$	van Genuchten (1980)
$S_e = \ln\left[e + \left(\dfrac{\varphi}{a}\right)^n\right]^m$	Fredlund et Xing (1994)

Le terme S_e représente la saturation effective ($S_e = (S-S_r)/(1-S_r) = (\theta-\theta_r)/(1-\theta_r)$); S est le degré de saturation; S_r est le degré de saturation résiduel; φ est la succion; e est l'indice des vides; φ_{VEA} est la valeur d'entrée d'air; λ est la pente de désaturation; θ et θ_r sont respectivement la teneur en eau volumétrique et la teneur en eau volumétrique résiduelle. Les autres symboles (a, n et m) sont des paramètres d'ajustement.

2.3.4 Prédiction de la CRE

Il est possible d'estimer la CRE via un modèle approprié. La plupart des modèles se basent sur la distribution granulométrique comme les suivants : Arya et Paris (1981), Arya et al. (1999), Fredlund et al. (1997), Fredlund et al. (2000) et Hwang et Powers (2003). Ces méthodes ne sont valides que pour des matériaux poreux granulaires, ce qui exclut les SPD et les sols à haute teneur en matière organique. Cette approche est aussi inadéquate pour les sols très fins. Dans ce cas, la forme de la CRE peut être affectée par différents paramètres géotechniques, comme la teneur en eau de compaction (Tinjum et al. (1997), Miller et al. (2002)).

Le modèle de Fredlund et al. (2000) permet de faire régresser une courbe de distribution granulométrique à partir de données expérimentales grâce à l'équation suivante :

$$\%passant = \left[\ln\left(Exp(1) + \left(\frac{a_{gr}}{d} \right)^{n_{gr}} \right) \right]^{-m_{gr}} \left[1 - \left(\frac{\ln\left(1 + \frac{d_{rgr}}{d}\right)}{\ln\left(1 + \frac{d_{rgr}}{d_m}\right)} \right)^7 \right] \qquad \textbf{Équation 2-7}$$

Où a_{gr} représente le point d'inflexion de la courbe de granulométrie (m), n_{gr} et m_{gr} représentent respectivement la pente de la courbe de granulométrie et la forme de la courbe dans la région des particules fines (sans dimension), d_{rgr} est un paramètre relié à la proportion de particules fines (m), d_m est le diamètre minimum des particules et d est le diamètre qui correspond au % passant.

À partir de l'équation de Fredlund et al. (2000) (Équation 2-7), il est possible de générer la CRE grâce au modèle Arya et al. (1999), via un compilateur mathématique, comme Scilab (INRIA, 2008) ou MatLab (The MathWorks, Inc, 2002). Il faut d'abord fixer une densité (estimée, obtenue ou visée) pour obtenir la porosité n=θ_S. Le modèle permet de calculer le rayon et le volume des pores pour chaque tranche de granulométrie. Ainsi plus on augmente les subdivisions (plusieurs tranches de granulométrie), plus le résultat est précis. Par segment, la masse de sol est convertie en volume, V_i, et la teneur en eau dans chaque segment est calculée en utilisant la relation suivante :

$$\theta_{vi} = \sum_{i=1}^{i=n_s} V_i \times \rho_s$$ **Équation 2-8**

Le terme n_s représente le nombre de segments.

La dernière étape du modèle calcule la succion pour le rayon de chaque segment, r_i, en utilisant la formule suivante :

$$\psi_i = \frac{2T\cos\theta_{AP}}{\rho_w \times g \times r_i}$$ **Équation 2-9**

Le terme T représente la tension de surface, θ_{AP}, l'angle de contact et r_i, le rayon représentatif des particules du segment i, déterminé par l'Équation 2-10.

$$r_i = R_i\sqrt{\frac{4en_i^{(1-\alpha_{AP})}}{6}}$$ **Équation 2-10**

Les termes e,α_{AP} et n_i sont respectivement l'indice des vides, le paramètre empirique représentant la tortuosité et le nombre de particules par masse unitaire dans le segment i.

L'estimation de la CRE à partir de la description de la texture du matériau, ou la banque de données UNSODA (US Department of Agriculture, 1999), est aussi possible. Comme dernier recours, il est aussi possible de le faire à partir des sols équivalents. Pour ce faire, il faut utiliser des logiciels qui ont été conçus dans ce but, comme ROSETTA (PC-Progress, 2003).

2.3.5 Approche expérimentale pour l'obtention de la CRE

Il existe aussi des méthodes en laboratoire pour obtenir la CRE. Citons seulement la table de tension, la marmite à pression, la plaque de pression et l'essai sur une colonne (Cabral et al (1999b), Parent (2003), McCartney (2007)).

Les plaques de pressions sont des cellules utilisant la technique de translation d'axe. L'échantillon, reposant sur une pierre poreuse, est mis dans une cellule où la pression d'air est augmentée. La base de la pierre poreuse est maintenue à pression atmosphérique. La pierre poreuse doit avoir une φ_{VEA} plus élevée que la pression appliquée dans la cellule pour éviter la désaturation de ce matériau. L'équilibre et le volume d'eau expulsé sous la succion peuvent être respectivement observé et mesuré par une burette Mariotte. Cette opération peut être répétée pour différentes pressions appliquées dans la cellule, pour ainsi obtenir plusieurs couples de valeurs [φ, θ] (McCartney 2007).

La table de tension est similaire à la plaque de pression, hormis qu'au lieu de générer une pression au sommet des échantillons, une tête d'eau négative fournit une succion à la base des échantillons. Les lectures des teneurs en eau, et donc des volumes d'eau expulsés se font, généralement, par essais destructifs en retirant l'échantillon et en le plaçant dans l'étuve pour mesurer la teneur en eau volumétrique.

Pour des matériaux très compressibles (comme les SPD) ou de texture plus particulière (comme un sol très organique comme le composte), ces méthodes décrites ci-haut peuvent être peu adaptées. Quelques recherches ont déjà été réalisées sur ce sujet, comme Cabral et al. (2004) qui a développé une cellule modifiée pour l'évaluation de la CRE.

Il existe aussi des méthodes dites directes pour obtenir les CRE avec un psychromètre, ou un papier filtre. Ces méthodes sont décrites en détail par Marinho (1994) et Smith et Mullins (2001).

2.4 Caractéristiques hydrauliques des sols non saturés : la fonction de conductivité hydraulique

2.4.1 Description de la fonction de conductivité hydraulique

Pour un sol donné, la fonction de conductivité hydraulique, FCH, décrit la relation entre la conductivité hydraulique et la succion du sol. Comme la CRE, la FCH est une caractéristique d'un matériau poreux donné. Elle est générée par les mêmes phénomènes de succion dans les pores que pour la CRE. La conductivité hydraulique du matériau poreux augmente lorsque la teneur en eau augmente (ou que la succion diminue) et atteint un maximum, k_{sat}, lorsque le matériau est complètement saturé (φ= 0).

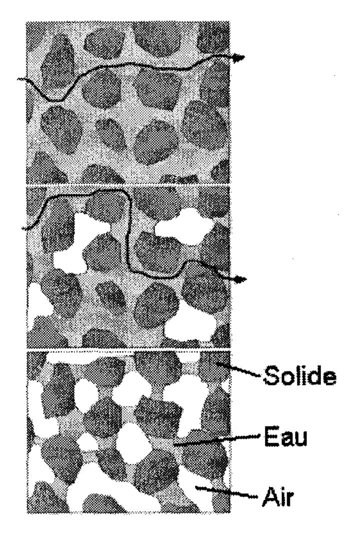


Figure 2-3 - Schématisation de l'écoulement dans un sol granulaire non saturé
(Adapté de Fredlund et Wilson (2000) par Parent (2003))

Ce phénomène peut être expliqué par la Figure 2-3. Lorsque le matériau est saturé (case du haut de la Figure 2-3), la conductivité est saturée, donc la plus élevée. Au fur et à mesure que le matériau se désature (case du milieu et du bas de la Figure 2-3), l'écoulement se fait de plus en plus difficilement (chemin d'écoulement inexistant ou plus tortueux) et la conductivité diminue.

2.4.2 Facteur influençant la fonction de conductivité hydraulique

McCartney (2007) énumère quelques études expérimentales qui ont présenté l'influence des propriétés du sol sur la FCH comme la porosité, les conditions de compactions et l'influence de la teneur en particules fines. McCartney (2007) présente aussi des études réalisées sur l'influence des variables environnementales sur la FCH comme la chimie de l'eau des pores du sol et la température.

2.4.3 Modèles de FCH

Les trois types de modèles mathématiques les plus courants pour définir la FCH sont les modèles empiriques, macroscopiques et statistiques.

La FCH peut être évaluée par des formules empiriques comme celle de Gardner (1958). Les modèles empiriques sont utilisés pour représenter des mesures de conductivité hydraulique en fonction de la succion ou de la teneur en eau. On utilise donc une équation de forme $k = f(\psi)$ ou $k = f(\theta)$ pour établir une courbe ajustée aux mesures, voir le Tableau 2-2.

L'utilisation de modèle statistique est basée sur les courbes de distributions granulométriques, dans le but de prédire les FCH (Leong et Rahardjo, 1997).

Enfin, les modèles macroscopiques permettent d'obtenir la FCH en insérant la CRE dans le modèle statistique de la FCH. Le modèle de la FCH le plus utilisé est obtenu en insérant l'équation de Mualem (1976) dans le modèle de van Genuchten (1980) (voir Tableau 2-3). Un autre modèle commun est obtenu en incorporant le modèle de Burdine (1953) dans celui de Brooks et Corey (1964) (voir Tableau 2-3).

Tableau 2-3 - Modèles de FCH

Équations	Auteurs
$k(S_e) = k_s S_e^{\,q}\left(\dfrac{\int_0^{S_e} \frac{d\sum_e}{\varphi^{1+p}}}{\int_0^{1} \frac{d\sum_e}{\varphi^{1+p}}}\right)^2$	**Mualem (1976)** p=0, q=0,5 Σ_e est la constante d'intégration représentant S_e
$k(\varphi) = k_s e^{-\alpha\varphi}$	**Gardner (1958)**
$k(\theta) = k_s \sqrt{S_e}\left[1-(1-S_e^{\,n})^m\right]^2$	Adaptation de McCartney (2007), tiré de **Mualem (1976) et van Genuchten (1980)**
$k(\theta) = k_s\, S_e^{\,3+\frac{2}{n}}$	Adaptation de McCartney (2007), tiré de **Burdine (1953) et Brooks-Corey (1964)**

2.4.4 Approche expérimentale pour l'obtention de la FCH

Plusieurs techniques ont été utilisées pour déterminer directement la FCH en laboratoire. (Benson et Gribb 1997). Cependant, ces approches sont longues et demandent un bon contrôle de la température et de l'humidité dans le laboratoire (Wendroth *et al.* 1993).

2.5 Écoulements non saturés et modélisations

2.5.1 Équation de Richards

L'écoulement dans les sols non saturés peut être décrit par l'équation de Richards (1931).

La description mathématique de l'écoulement vertical est obtenue en considérant d'une part l'équation de continuité (l'Équation 2-11) qui exprime la conservation de la masse d'eau dans un volume élémentaire représentatif du sol (Ngnepieba et al., 2002) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z}$$ **Équation 2-11**

Le terme θ représente la teneur en eau volumique; q, la densité de flux volumique; t, le temps et z, la profondeur mesurée positivement vers le bas.

On doit aussi prendre en considération, d'autre part, l'équation de la quantité de mouvement, l'Équation 2-12, qui est l'équation de Darcy (1856) et qui s'exprime ainsi :

$$q = -k(\theta)\frac{\partial h}{\partial z}$$ **Équation 2-12**

Le terme h représente la charge hydraulique, $k(\theta)$, la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau.

La loi de Darcy permet de décrire les écoulements dans un milieu poreux saturé : elle exprime la proportionnalité entre le flux d'eau, q, et le gradient de charge hydraulique. Bien qu'elle fut conçue à l'origine pour les écoulements en milieux saturés, elle fut étendue par Richards en 1931 à l'écoulement en zone non saturée en stipulant que la constante de proportionnalité k, appelée conductivité hydraulique, est fonction de la teneur en eau du sol. La combinaison de l'Équation 2-11 et de l'Équation 2-12 permet d'obtenir l'équation de Richards qui, à une dimension, prend cette forme :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[k(\theta)(1 - \frac{\partial h_p}{\partial z}) \right]$$ **Équation 2-13**

Le terme h_p représente la pression relative par rapport à la pression atmosphérique exprimée en hauteur d'eau, $h=h_p-z$.

2.5.2 Solution de l'équation de Richards

La solution exacte de cette équation est cependant difficile à obtenir à cause des fortes dépendances non linéaires des paramètres (FCH et CRE) aux variables dépendantes (Serrano, 2004). Les logiciels (comme SEEP/W ou Hydrus 3D, présentés à la section 3.3) sont donc les outils couramment utilisés en ingénierie pour résoudre l'équation de Richards.

2.5.3 Obtention des paramètres nécessaire à la modélisation

Pour effectuer ces modélisations d'écoulement en milieu non saturé, c'est-à-dire pour résoudre l'équation de Richards, il est nécessaire de poser préalablement les propriétés hydrauliques des matériaux poreux, soit les FCH. Pour étudier, dans le temps et dans l'espace, la variation de la teneur en eau, il est aussi nécessaire d'avoir les CRE des matériaux.

2.6 Barrière capillaire : une application des principes d'écoulement non saturés

2.6.1 Théorie des barrières capillaires inclinées

2.6.1.1 Barrière capillaire inclinée

Une barrière capillaire est une combinaison de deux couches de matériaux poreux juxtaposées, dont les pores de la couche supérieure, la couche de rétention capillaire (CRC), sont plus fins que ceux de la couche inférieure, la couche de bris capillaire (CBC) (Parent et Cabral, 2006a). En respect avec la théorie des écoulements d'eau dans les milieux non saturés, lorsqu'une barrière capillaire est soumise à une infiltration d'eau, la couche supérieure aura tendance à accumuler l'eau, l'empêchant de s'infiltrer dans la CBC, (Parent et Cabral, 2006a).

La phénoménologie des barrières capillaires peut être expliquée grâce aux propriétés hydrauliques (CRE et FCH) de deux matériaux (CRC/CBC) qui ont des granulométries différentes. À la Figure 2-4a, on constate qu'à faible succion, le matériau constituant la CRC présente une conductivité hydraulique inférieure à celle du matériau constituant la CBC, tel que l'intuition le suppose. Cependant, pour des succions plus élevées, la conductivité hydraulique de la CBC devient plus faible, ce qui crée un bris hydraulique à l'interface entre les deux. C'est ce bris capillaire qui est à l'origine de l'effet de barrière capillaire. Comme le montre la Figure 2-4b, il y a continuité dans le profil de succion, mais, à l'interface, la CRC est encore saturée, alors que la CBC est non saturée. Le degré de saturation dans la CBC, étant plus faible, indique que ce matériau s'est drainé, tandis que la CRC maintient un haut degré de saturation.

De plus, tel qu'indiqué à la Figure 2-4c, le profil de succion dépend de la valeur de q, soit le débit d'infiltration. Ce dernier peut varier de plusieurs ordres de grandeur. Sa valeur doit être déterminée à l'aide de modèles appropriés considérant les interactions sol-atmosphère (VADOSE/W ou HYDRUS-3D, par exemple).

La barrière capillaire peut être utilisée comme recouvrement de site d'enfouissement sanitaire (Figure 2-5-a). Utilisée comme recouvrement horizontal (Figure 2-5-b), elle agira comme

barrière évapo-transpirative. L'eau sera accumulée dans la CRC lors des périodes d'infiltration (pluie, fonte des neiges, etc.) et la CRC évacuera l'eau par transpiration ou par évaporation lors des périodes sèches (Khire et al., 2000); (Nyhan J. W., Schofield T. G. et Starmer R. H., 1997). Par contre, si le recouvrement est incliné, une composante de l'infiltration se transforme en drainage latéral (Figure 2-5 c) (Aubertin et al. (1997), Kämpf et Montenegro (1997)).

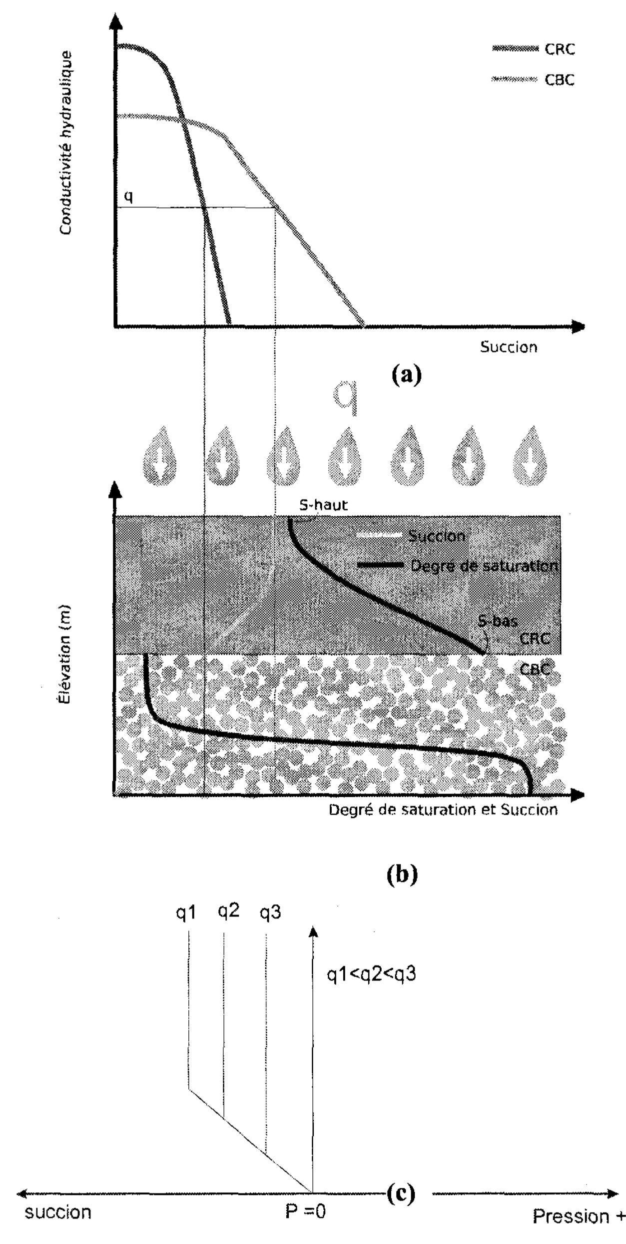
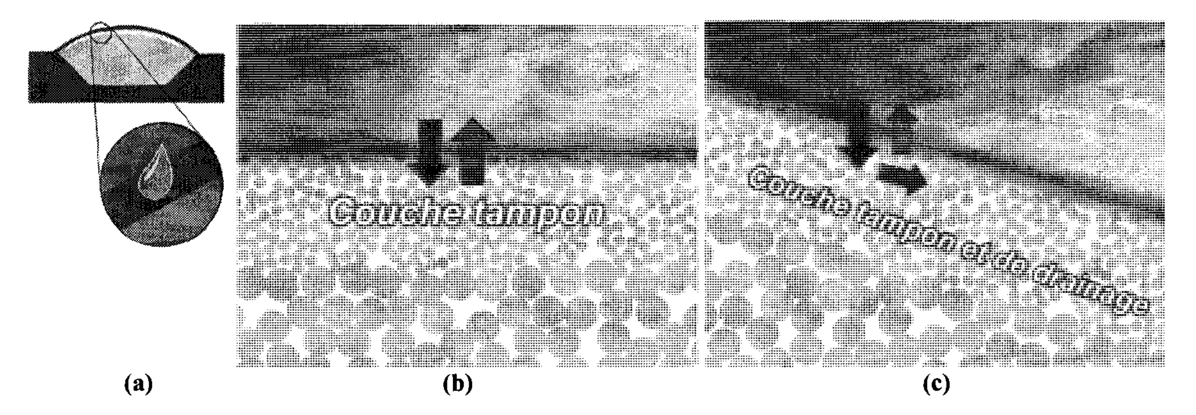


Figure 2-4 - Profils de degré de saturation et de succion dans une barrière capillaire. Image tirée d'El Ghabi 2007



(a) (b) (c)

Figure 2-5 - Barrière capillaire (a) problématique (b) horizontale et (c) inclinée

2.6.1.2 Longueur de transfert

L'eau infiltrée dans la barrière hydraulique est drainée latéralement dans la CRC. On nommera Q_{max} le débit horizontal maximal qu'une CRC peut dévier. L'eau commence à s'infiltrer dans le sol sous-jacent au moment où la succion est suffisamment faible pour que les deux fonctions de conductivité hydraulique de deux couches formant la barrière capillaire se croisent (Ross 1990). La longueur de transfert (LT) est la distance horizontale à partir du haut de la pente jusqu'au point de transfert, c'est-à-dire le point à partir duquel Q_{max} est atteint. C'est aussi à ce point que l'eau commence à s'infiltrer dans la CBC, ou que son infiltration dans la CBC peut être considérée comme non négligeable.

La longueur de transfert (LT) peut être exprimée comme suit :

$$LT = \frac{Q_{max}}{q}$$ **Équation 2-14**

Selon Parent et Cabral (2006a), les hypothèses à considérer pour l'application de cette définition, sont :

- La nappe phréatique se situe loin en dessous de l'interface CRC/CBC;
- Un sol fin de grande épaisseur repose sur un sol plus grossier de grande épaisseur;

- L'interface CRC/CBC est inclinée et la longueur totale de la pente est plus grande que la LT;
- Un débit d'eau uniforme, q, est appliqué au sommet de la CRC.

Différents modèles sont proposés pour quantifier le Q_{max} : Biliotte et al (1988), Ross (1990), Morel-Seytoux (1994) et Walter et al. (2000).

A) Billiotte et al, (1988)

Billiotte et al, (1988), cité dans Ross (1990), a proposé une formule donnant des valeurs quelque peu supérieures à Ross (1990) pour des pentes de moins de 45°.

$$Q_{\max} = k_{sat}\ b \tan \phi$$ **Équation 2-15**

Où b est l'épaisseur de la CRC en mètre.

B) Ross (1990)

Selon Ross (1990), Q_{max} peut être exprimée par l'équation suivante :

$$Q_{\max} = k_{sat} \tan(\Phi) \int_{\varphi_{CBC}}^{\varphi_{CRC}} k_r(\varphi) d\varphi$$ **Équation 2-16**

Où k_{sat} est la conductivité hydraulique saturée du sol en m/s, k_r est la conductivité hydraulique relative (k/k_{sat}), Φ est l'angle de la pente en %, ψ_{CRC} et ψ_{CBC} sont respectivement les succions (m) dans les sols fin et grossier correspondants au débit d'infiltration q (m/s).

Selon Ross (1990), les hypothèses à considérer pour l'application de cette définition, sont : les frontières supérieures et inférieures du modèle sont supposées être assez distancées, le bas de la pente est supposé être bien drainé et assez loin du haut de la pente et il n'y a aucun écoulement horizontal.

C) Morel-Seytoux (1994)

Morel-Seytoux (1994) a proposé une formule différente, donnant des valeurs quelque peu supérieures au modèle de Ross (1994), selon Bussière et al. (2007). Morel-Seytoux (1994) propose d'utiliser l'équation de Brooks et Corey (1964) et de poser le paramètre φ dans l'équation générale. Morel-Seytoux (1994) propose l'équation suivante pour calculer le Q_{max} qui peut être drainé par la CBC :

$$Q_{\max} = k_{sat} \tan\phi \left[\varphi - \varphi_{VEA} \left(\frac{q \times p}{k_s} \right)^{-\frac{M}{p}} \right]$$ **Équation 2-17**

Le terme φ représente la pression capillaire en mètre (Morel-Seytoux et Khanji, 1974), ψ_{VEA} est la valeur d'entrée d'air (en mètre), M est un paramètre de Brooks et Corey (1964) pour décrire la CRE, P est un paramètre de Brooks et Corey (1964) pour décrire la FCH. P est calculé par la relation p=3+2M (Morel-Seytoux et al., 1996).
Cette théorie suppose que l'eau ne s'infiltrera pas à travers l'interface tant que la succion d'eau à l'interface ne tombera pas sous la valeur d'entrée d'eau du matériau grossier.

D) Walter et al. (2000)

Walter et al. (2000) supposent que l'infiltration dans la couche de sol grossier suit une autre configuration que celle proposée par Ross (1990) et qu'il y a une infiltration constante avant le transfert.

Bussière et al. (2007) ont montré que le modèle de Ross (1990) est plus conservateur que le modèle de Morel-Seytoux (1994), de 22 à 24%, selon la pente de la barrière capillaire. Tel que mentionné plus tôt, Billiotte et al (1988) donne aussi des LT plus élevées que celles de Ross (1990). Ce sera donc ce dernier modèle qui sera considéré dans ce mémoire.

2.6.1.3 Considérations des longueurs de transfert pour les modélisations numériques

Le modèle de Ross (1990) présente certaines limites. Il suppose que l'infiltration dans la CBC n'a lieu que lorsque la LT est atteinte. En aval du point de transfert, la CRC draine, selon le modèle de Ross (1990), la totalité de l'eau. Ceci n'est pas conforme avec ce qui est observé en simulation numérique (Webbs, 1997). En effet, l'infiltration dans la couche inférieure de la barrière capillaire BC, q_i, augmentera progressivement le long de l'interface CRC/CBC pour atteindre, asymptotiquement, la valeur du taux d'infiltration uniforme au-dessus de la CRC, (Parent et Cabral, 2006a).

Parent et Cabral (2006a) ont proposé une relation pour quantifier l'infiltration dans la CBC, q_i, à l'emplacement où la LT est atteinte, tel que déterminée par le modèle phénoménologique de Ross (1990) (Équation 2-15).

$$q_i=0{,}998q^{1{,}024}$$ **Équation 2-18**

où q est le débit appliqué au sommet de la BC.

2.6.2 Performance et limites des CEBC

La performance d'une CEBC réside dans la capacité de la CRC à drainer l'eau latéralement et ainsi limiter les infiltrations dans la CRC. Une CEBC peut être efficace pour dévier l'eau si le matériau composant la CRC est suffisamment perméable. En respectant ce critère, une CEBC demeure apte à limiter les infiltrations dans la CBC seulement pour de faibles débits de sollicitation arrivant au sommet de la CRC (q, Équation 2-14). De plus, l'utilisation d'un tel matériau pour constituer la CRC diminue le ruissellement et rend la barrière susceptible de subir de fortes infiltrations.

Selon Parent et Cabral (2006a), l'efficacité d'une CEBC peut être augmentée en plaçant une barrière hydraulique au-dessus de la barrière capillaire. Cette barrière hydraulique doit être constituée d'un matériau ayant une conductivité hydraulique saturée suffisamment faible pour limiter q, de sorte de la LT visée puisse être atteinte (Équation 2-14). La barrière hydraulique

permet d'atténuer les infiltrations qui atteignent la CRC, qui sont limitées à la conductivité hydraulique saturée du matériau fin.

2.6.3 Instrumentation des CEBC

Différents instruments peuvent être installés pour évaluer la performance d'une CEBC. Ces instruments, comme des lysimètres, permettent, entre autres, d'évaluer la LT. Il existe plusieurs types de lysimètres. Les lysimètres de type zéro-tension, simples à construire et à installer, sont un contenant apte à recueillir l'eau de percolation du matériau où il est placé. Le contenant est relié à l'atmosphère par un tuyau dont l'embouchure est placée à sa base. Ce type d'appareil permet de quantifier l'eau qui s'infiltre dans le matériau poreux, ainsi que de faire un suivi de la qualité de ces eaux.

Bews et al. (1997), ainsi que Parent et Cabral (2006b), indiquent qu'un lysimètre fonctionne adéquatement s'il respecte les deux critères suivants :

- Critère n° 1 : Le drainage se fait en permanence à la base du lysimètre.
- Critères n° 2 : Le lysimètre ne dévie ou n'attire pas l'eau de percolation.

Pour respecter le critère n° 1, la pression à la jonction lysimètre - tuyau de drainage doit être maintenue à la pression atmosphérique. Pour respecter le critère n° 2, il doit y avoir absence de gradient, i, (Figure 2-6) au sommet. L'énergie totale (h_{Tot}) au sommet du lysimètre à l'intérieure de ce dernier (point A1 de la Figure 2-6) doit donc être égale à l'h_{Tot} au sommet du lysimètre à l'extérieure de ce dernier (point A2 de la Figure 2-6). Puisque l'énergie d'élévation, h, est la même pour ces deux points, φ_1 doit être égale à φ_2. Ceci est respecté lorsque les parois du lysimètre sont assez hautes ((Figure 2-6 a) versus Figure 2-6 b)). Le point de rupture de la succion, présenté à la Figure 2-6, est une fonction du débit percolant le recouvrement et arrivant au sommet du lysimètre. La procédure de conception de ces lysimètres est expliquée par Parent et Cabral (2006b).

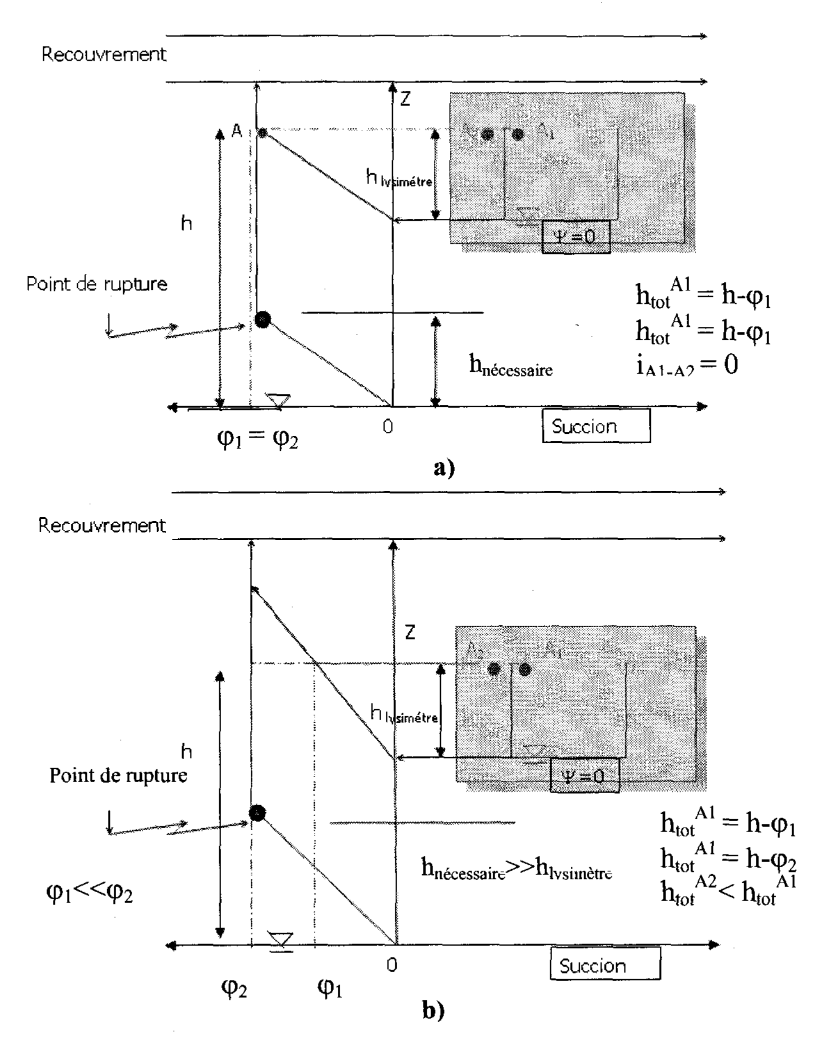


Figure 2-6 a) - Lysimètre ayant une hauteur suffisante pour en assurer l'efficacité
b) Lysimètre n'ayant pas une hauteur suffisante pour en assurer l'efficacité

2.6.4 Composantes d'une CEBC

Les CEBC peuvent avoir jusqu'à six composantes de base (Aubertin et al. 1995), comme le présente la Figure 2-7.

- A et B : couche de surface et couche de protection

Ces couches agissent comme protection pour le recouvrement. Elles supportent la végétation et agissent comme tampon évapo-transpiratrif et thermique (Aubertin et al., 1995).

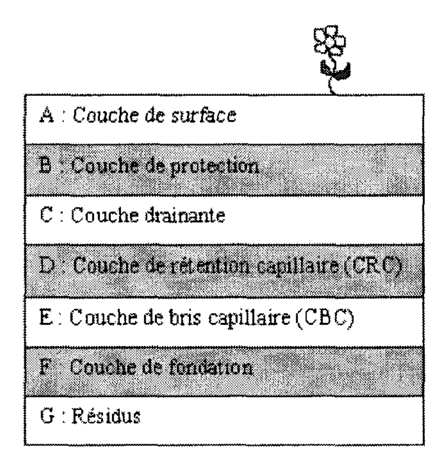


Figure 2-7 - Composantes d'une couverture (adapté d'Aubertin et al. (1995) par Parent (2003))

- C : Couche drainante

Cette couche permet de diminuer le gradient hydraulique à l'interface des couches C et D en réduisant l'accumulation d'eau par un écoulement latéral plutôt que vertical. On utilise généralement des matériaux à granulométrie grossière ou des géotextiles drainants. Cette couche réduit la remontée capillaire qui pourrait engendrer la désaturation de la couche D, ce qui ne conviendrait pas aux CEBC conçues pour rester saturées en vue de ralentir la migration des gaz. La conductivité hydraulique à l'état saturé (k_{sat}) du matériau formant cette couche doit être de l'ordre de 1×10^{-5} à 1×10^{-3} m/s. Son épaisseur est généralement de plus de 30 cm (Aubertin et al., 1995).

- D : Couche de rétention capillaire (CRC)

Si la CEBC est utilisée comme barrière évapo-transpirative, la couche D emmagasinera l'eau et favorisera l'assèchement de la couche E qui aura ainsi une faible conductivité hydraulique. On utilise généralement des matériaux dont la pente de la FCH est douce et dont la k_{sat} est d'autour de 1×10^{-7} m/s. Le matériau utilisé doit aussi avoir une VEA élevée. Pour que cette dernière condition soit respectée, le matériau doit contenir, en premier lieu, des particules fines. Cette couche a une épaisseur variable selon le matériau utilisé (Parent, 2003).

- E : Couche de bris capillaire (CBC)

Le bris capillaire que génère la superposition de la CBC et la CRC (section 2.6.1.1) permet de garder la couche D à un haut degré de saturation. De plus, sa faible hauteur capillaire limite la

remontée des lixiviats contaminés vers la couche D. Pour cette couche, on peut utiliser le même matériau que pour la couche C (Parent, 2003).

- F : Couche de fondation

Cette couche est souvent celle placée par intérim en attendant les travaux plus avancés. Le matériau utilisé est grossier et peu coûteux. Son épaisseur est d'environ 30 cm (Parent, 2003).

2.6.5 Réglementation québécoise

La Figure 2-8 présente les différentes couches formant le recouvrement final type d'un lieu d'enfouissement technique, tel que prescrit par l'article 50 du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR) (Gouvernement du Québec, 2008). Le recouvrement avec effet de BC n'est pas spécifié dans la réglementation canadienne.

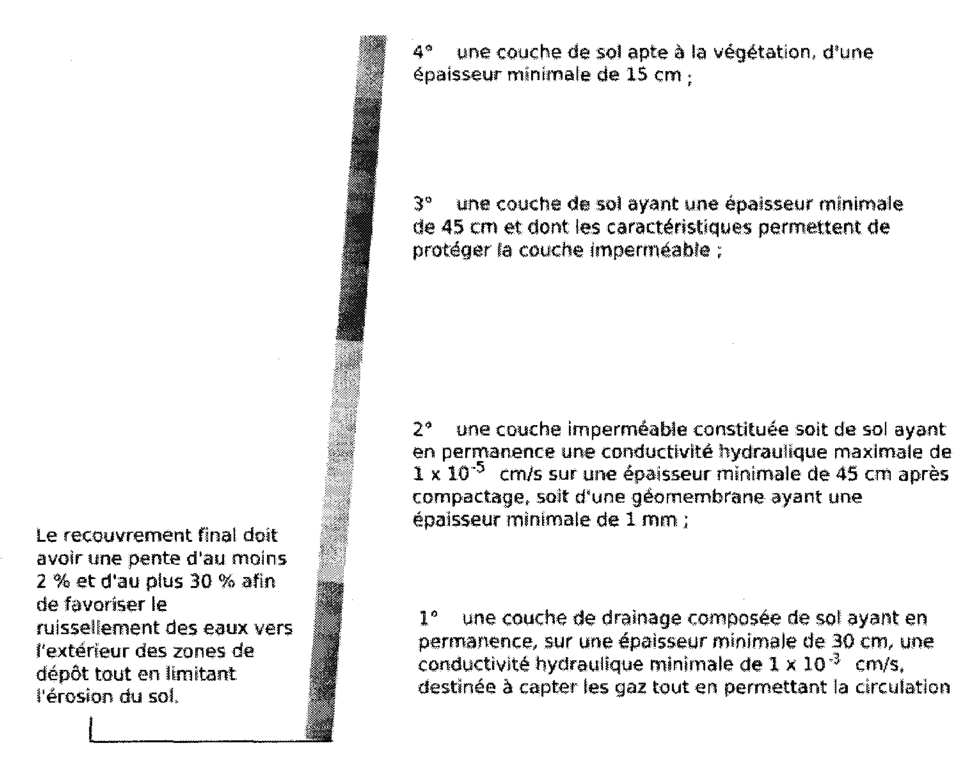


Figure 2-8 - Détails de l'article 50 du projet de règlement sur l'élimination des matières résiduelles (figure tiré de El Ghabi, 2007)

Le recouvrement prescrit par le REIMR permettrait d'insérer une barrière hydraulique (couche n° 3) sur une CRC (couche n° 2) et une CBC (couche n° 1).

3 APPROCHE ET MÉTHODOLOGIE

La Figure 3-1 présente l'organigramme de la démarche scientifique effectuée pour réaliser les objectifs décrits dans le chapitre 1. Les cases vertes décrivent les travaux reliés à la caractérisation en laboratoire des matériaux composant le recouvrement alternatif étudié, soit des essais Proctor, des essais de distribution granulométrie et des essais pour évaluer la CRE. Les cases bleues présentent l'importance des simulations numériques pour le projet. Enfin, les cases grises décrivent les activités *in situ*, reliées au recouvrement alternatif : échantillonnage, conception, construction, instrumentation et prise de mesures.

Les flèches montrent les interactions qui existent entre ces différentes activités. L'échantillonnage des sols permettra d'évaluer les caractéristiques hydrauliques des matériaux en laboratoire. Ces dernières seront utilisées pour la réalisation des simulations numériques et pour la conception. Enfin, l'instrumentation sur le terrain permettra de quantifier la performance du recouvrement alternatif proposé, d'évaluer les propriétés hydriques des matériaux ainsi que de quantifier les sollicitations météorologiques, nécessaires à la modélisation numérique.

En ce sens, le chapitre 3 présente la méthodologie retenue pour répondre aux objectifs du projet. Comme à la Figure 3-1, ce chapitre sera séparé en trois sections : le recouvrement alternatif étudié sur le terrain, les essais au laboratoire ainsi que les simulations numériques.

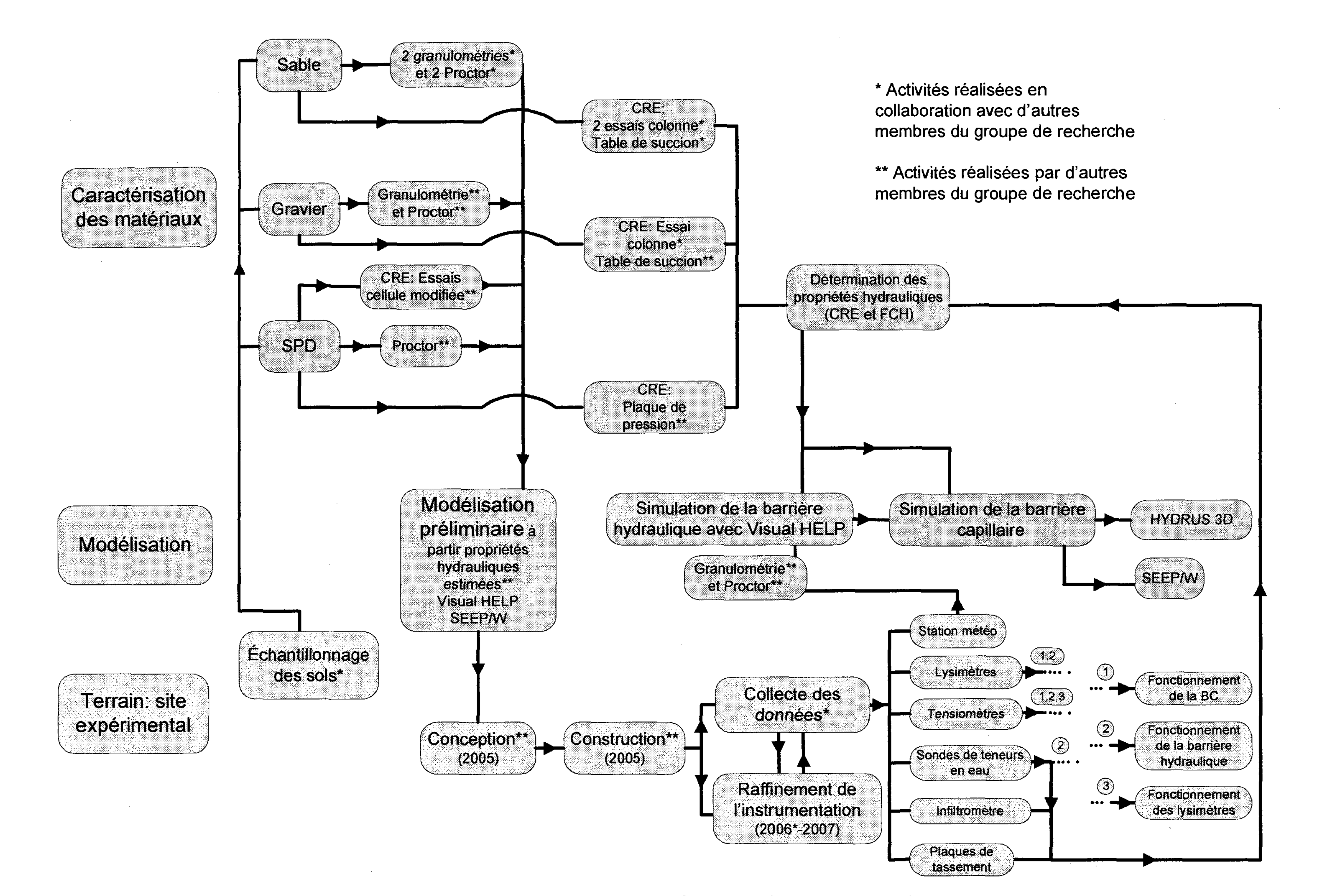


Figure 3-1 - Organigramme de la démarche scientifique du projet

3.1 Recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps

3.1.1 Localisation

La Figure 3-2 présente la localisation du site expérimental de Saint-Tite-des-Caps, une municipalité près de la ville de Québec. Les coordonnées du site sont : 47°06'41.08''N; 40°49'21.11'' (Google, 2008).

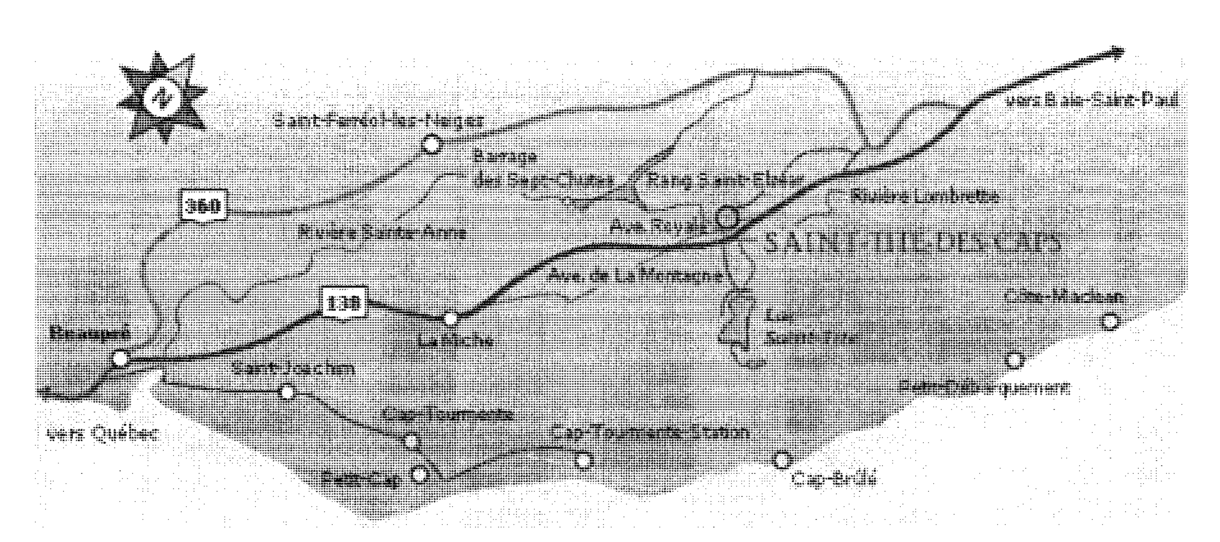
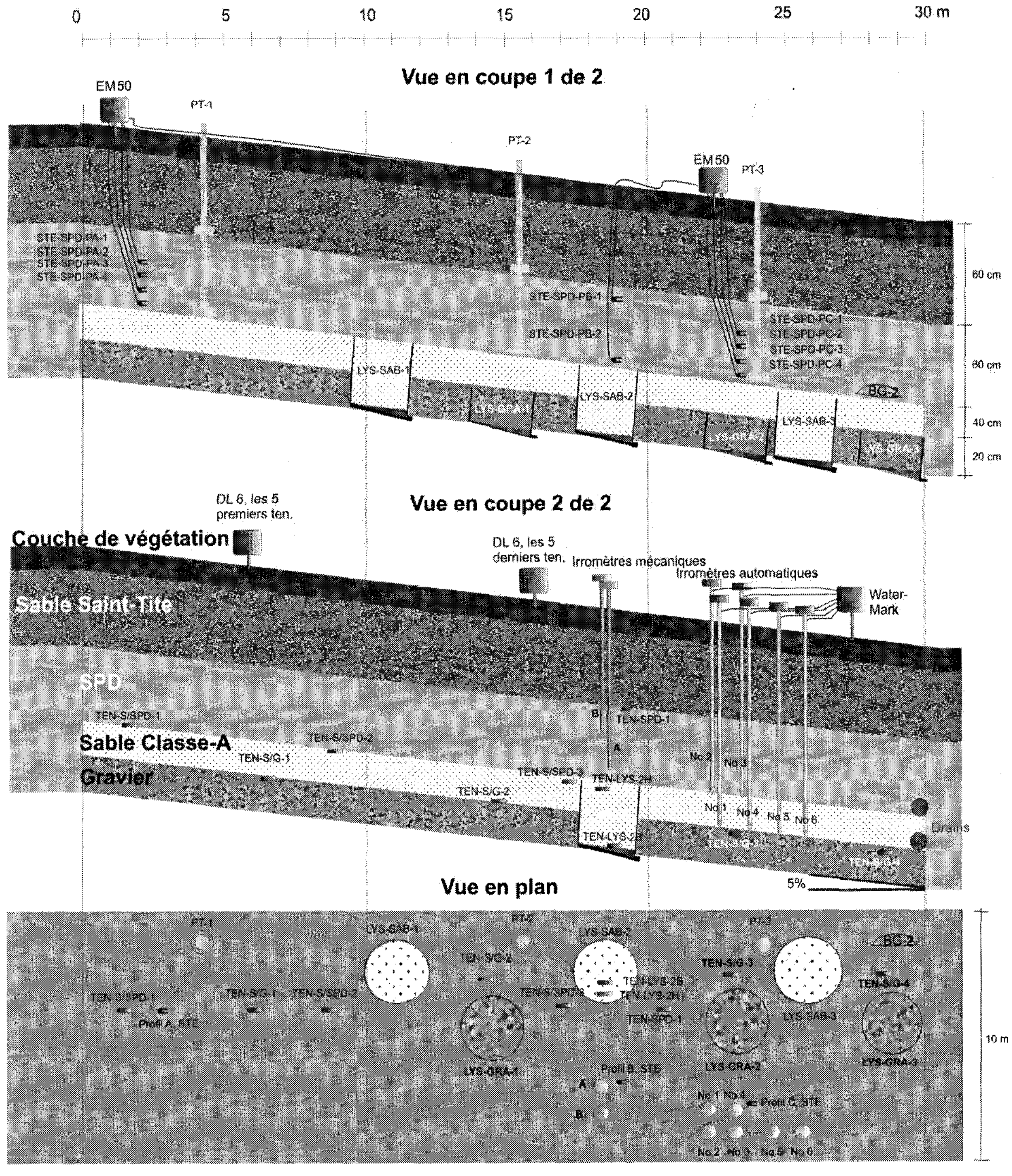


Figure 3-2 - Localisation du site expérimental, à Saint-Tite-des-Caps
(Municipalité de St-Tite-des-Caps, 2008)

3.1.2 Plans du recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps

Le recouvrement alternatif proposé sur le terrain prend la forme d'une cellule expérimentale de 30 mètres de long par 10 mètres de large. La Figure 3-3 présente deux vues en coupe et une vue en plan de cette cellule expérimentale. La description des couches de sols et des instruments est donnée, respectivement, aux sections 3.1.4 et 3.1.6. Les acronymes utilisés à la Figure 3-3 sont définis à l'Annexe B.



Note: Pas à l'échelle

La couche de végétation n'est pas encore installée. La végétation croit à même le sable Saint-Tites.
La station météo et le ballon gonflable no 3 ne sont pas représentés ici, car ils se trouvent hors de la cellule.
Le ballon gonflable no 1 n'est pas représenté ici, car il a été retiré après détection de défectuosités.
Les sondes à gaz ne sont pas représentées ici.

Figure 3-3 - Vues en plan et en coupe de la cellule expérimentale de Saint-Tite-des-Caps

3.1.3 Lieu d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps

La cellule expérimentale contenant le recouvrement alternatif étudié ne couvre qu'une petite partie du lieu d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps. La Figure 3-4 présente l'environnement autour de la cellule expérimentale.

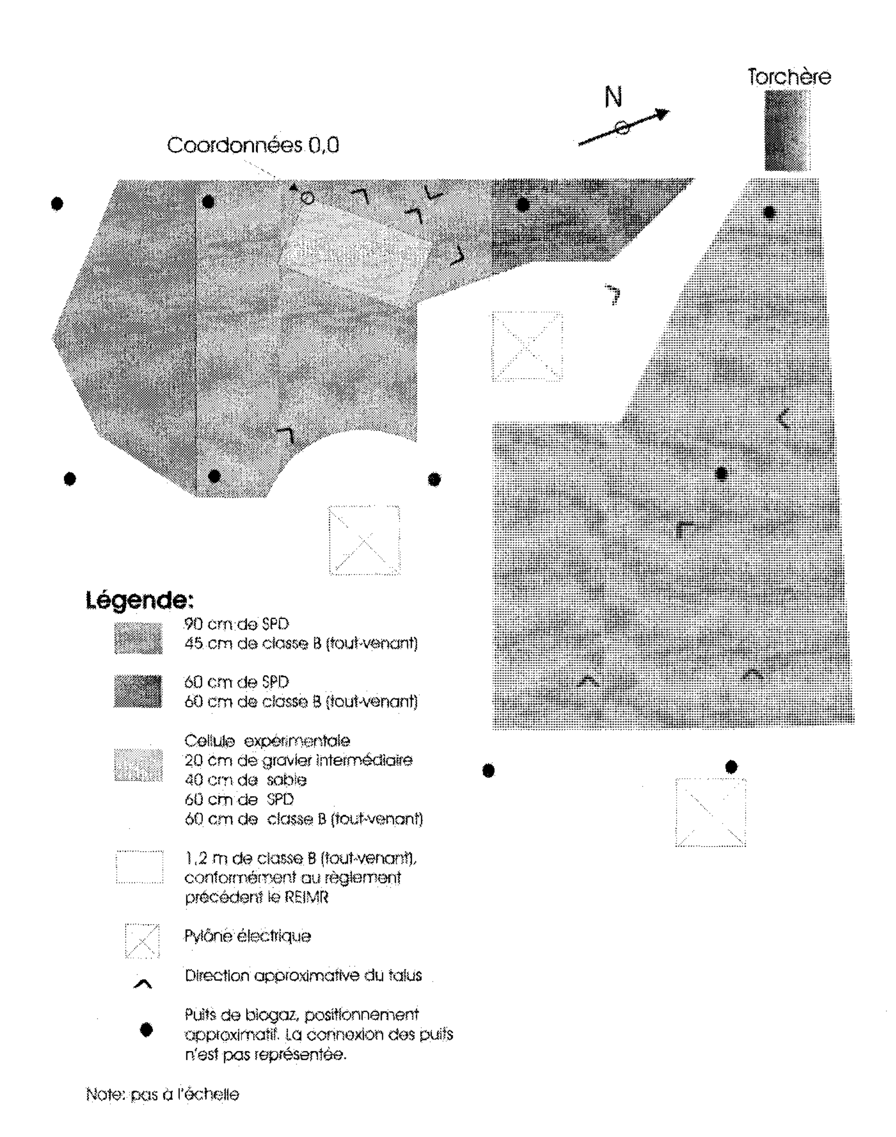


Figure 3-4 - L'environnement de la cellule expérimentale de Saint-Tite-des-Caps

Le Tableau 3-1 présente le type de déchet que reçoit le lieu d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps. La cellule expérimentale ayant été construite en 2005, le type de déchet protégé par ce recouvrement est, principalement, des cendres d'incinérateurs.

Tableau 3-1 - Caractérisation des déchets reçus au site d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps
(communications personnelles avec Suzanne Boisvert, ville de Québec)

Type de matière résiduelle	Secteur de Saint-tite-des-Caps			
	2003	2004	2005	2006
Déchets domestique (1)	14 294	5 890	885	0
Déchets ICI (2)	17 826	8 261	141	0
Boues municipales (3)	53	55	16	0
Matériaux secs	2 844	7 667	30	0
Sols et sables	3 001	991	84	0
Encombrats ménagers	n/d	n/d	n/d	0
Cendres d'incinérateurs				
Mâchefer	91 440	68 865	0	0
Cendres volantes décontaminées	3 700	4 701	0	0
Total	133 158	96 430	1 156	0

(1) : Comprend les déchets des collectes résidentielles
(2) : Comprend les déchets des collectes ICI, les balayures de rue
(3) : Comprend les boues de puisards, boues de stations d'épuration municipales brutes et chaulées

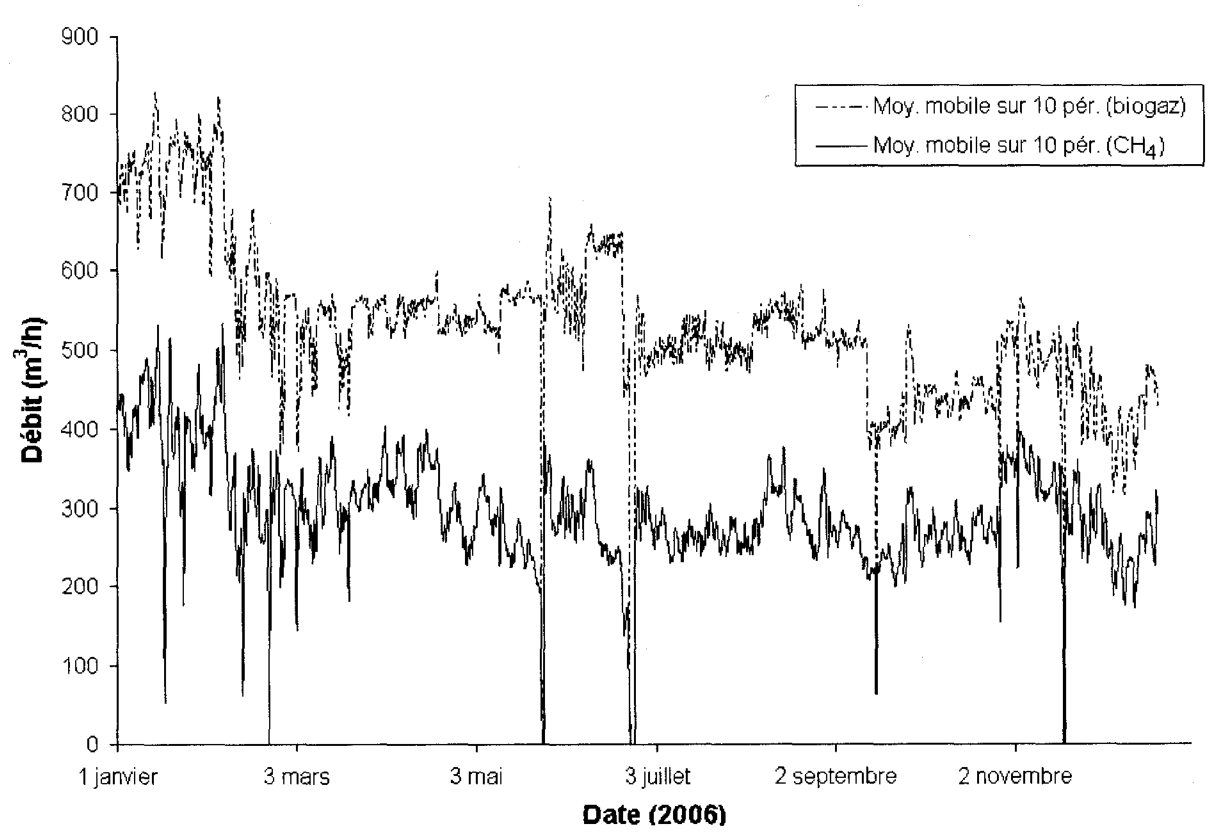


Figure 3-5 - Débits de biogaz et de méthane (CH_4) brûlés à la torchère
(communications personnelles avec Suzanne Boisvert, Ville de Québec)

La Figure 3-5 présente les débits de biogaz et de méthane (CH_4) enregistrés pour l'année 2006 et brûlés à la torchère, illustrée à la figure 3.4. Ceux de l'année 2007 n'étaient pas encore disponibles au moment de la rédaction de ce mémoire.

3.1.4 Composition du recouvrement alternatif

Cette section présente les matériaux composant le recouvrement illustré à la Figure 3-3.

3.1.4.1 Sable Saint-Tite

Le sable Saint-Tite est en fait le tout-venant déjà en place. Il crée une couche de protection pour les matériaux sous-jacents.

3.1.4.2 Sous-produits de désencrage

Les sous-produits de désencrage (SPD) sont des sous-produits du procédé de recyclage du papier. Il s'agit de la fraction du papier dans laquelle l'encre issue des impressions est trop concentrée pour que les fibres puissent être utilisées pour fabriquer à nouveau du papier. Traditionnellement, les résidus de désencrage sont entreposés par enfouissement ou bien sont incinérés (Parent, 2003). Le SPD est composé en majeur parti de cellulose (34%), un composé volatile, ainsi que de calcite (29,2%), un composé non volatil. Ce matériau contient aussi de petites quantités de lignine, d'hémicellulose et de minéraux (Panarotto et al., 2005).

Les SPD ont été utilisés plus d'une fois comme matériau de recouvrement alternatif de lieux d'enfouissement municipaux (par exemple : Moo-Young et Zimmie (1996), Burnotte et al. (2000), Kamon et al. (2001)) et comme barrière à oxygène pour contrôler le drainage minier acide (par exemple : Cabral et al. (1999b), Panarotto et al. (2005)).

Dans le cas du recouvrement alternatif présentement étudié, le SPD agit comme barrière hydraulique, soit comme un recouvrement à faible perméabilité exploité pour limiter les infiltrations d'eau à travers les couches sous-jacentes, comme la CRC.

3.1.4.3 Sable classe A

Le sable classe A est la couche supérieure de la BC et agit comme CRC. Elle a donc pour but de drainer l'eau et de limiter, par les forces capillaires, les infiltrations d'eau dans la couche inférieure.

3.1.4.4 Gravier intermédiaire

Le gravier mis en place est la couche inférieure de la BC et remplit le rôle de CBC. Le gravier crée donc un contraste de perméabilité avec le sable, en état non saturé, limitant ainsi les infiltrations d'eau dans ce matériau.

3.1.5 Conception du recouvrement alternatif

3.1.5.1 Caractérisation de la barrière hydraulique

Des essais de rétention d'eau ont déjà été réalisés en utilisant une cellule de plaque de pression modifiée (Figure 3-6), développée au sein du laboratoire de mécanique des sols de l'Université de Sherbrooke, pour déterminer la CRE des SPD (Cabral et al. (1998), Cabral et al. (1999a), Cabral et al. (2000), Panarotto et al. (1999), Burnotte et al. (2000)). Ce dispositif a également été repris par Parent (2003) pour l'étude des couvertures avec effet de barrière capillaire avec des applications concernant l'utilisation des SPD comme matériau de recouvrement de sites de résidus miniers et de lieux d'enfouissement sanitaire. De façon sommaire, le principe réside à appliquer une pression au sommet de l'échantillon et à étudier la diminution de la teneur en eau, en quantifiant le volume d'eau expulsée dans la burette graduée *Pout*. Parent (2003) présente plus en détail le mode opératoire de cet essai.

Un exemple représentatif de CRE obtenue pour le SPD par cet essai est présenté à la Figure 3-7. Le modèle de van Genuchten (1980) a été utilisé pour la régression, les paramètres du modèle sont inscrits à même la figure.

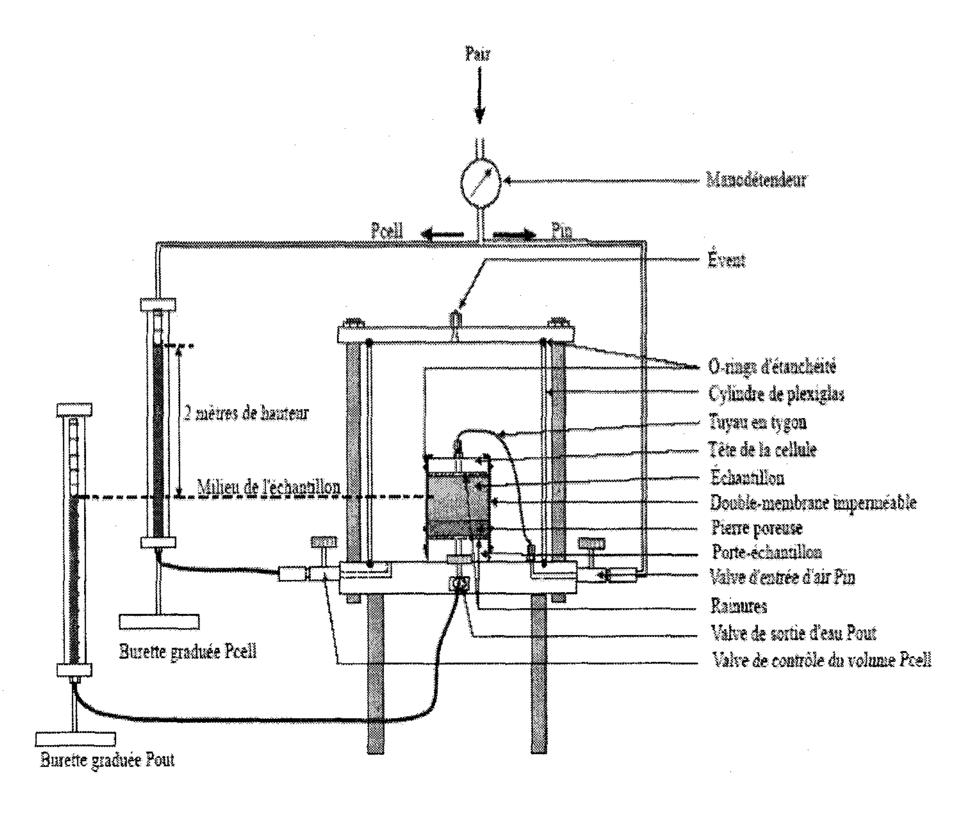


Figure 3-6 - Dispositif de montage pour l'essai de laboratoire (Parent, 2003)

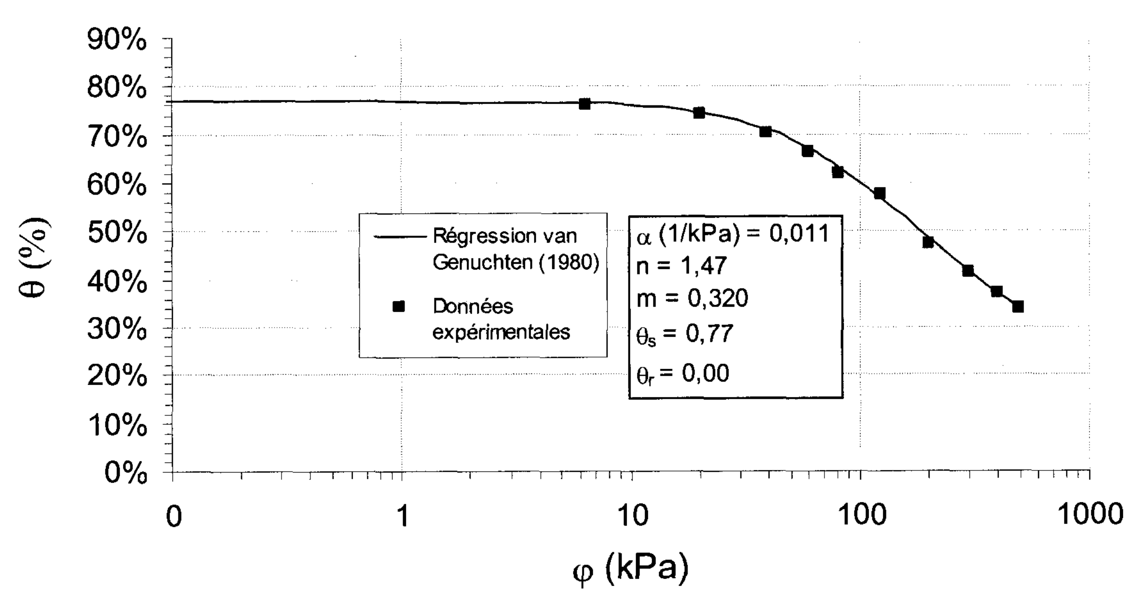


Figure 3-7 - CRE du SPD obtenue au laboratoire et lissée par le modèle de van Genuchten (1980) (Parent, 2006)

Tel que mentionné à la section 2.4, il est difficile d'évaluer, en laboratoire, les FCH. Une des stratégies les plus souvent utilisées est d'évaluer, expérimentalement, la conductivité hydraulique saturée et la CRE et d'estimer la FCH, à l'aide de modèle tel que présenté au chapitre 2. Suivant cette stratégie, l'équation de van Genuchten (1980), appliquée à la CRE des SPD, donne la FCH présentée à la Figure 3-8.

Pour obtenir cette FCH, il fallait fixer une valeur pour la conductivité hydraulique saturée. Selon une étude extensive faite sur la conductivité hydraulique des SPD par Robart (1998), les valeurs de conductivité hydraulique saturée se situent entre 10^{-10} et 10^{-8} m/s. Les valeurs varient en fonction de la teneur en eau et de l'indice des vides. Pour les valeurs moyennes de masse volumique sèche obtenue au site de Saint-Tite-des-Caps, au début de la campagne de mesure, soit 500 kg/m^3 – voir l'annexe A – et pour une densité relative de 2000 kg/m^3 comme valeur représentative (Bédard, 2005), l'indice des vides lors du compactage de la cellule expérimentale serait de 3,0. Pour cette valeur, la conductivité hydraulique serait environ de 4×10^{-9} m/s, si on se fie à une série d'essais de perméabilité à l'œdomètre présenté dans Parent (2006). D'après Planchet (2001), la conductivité hydraulique varierait entre 2×10^{-9} m/s et 7×10^{-9} m/s, avec une moyenne de 5×10^{-9} m/s, des résultats qui sont confirmés par les études de Burnotte et al. (2000). La valeur de la conductivité hydraulique saturée du SPD a été fixée à 1×10^{-8} m/s.

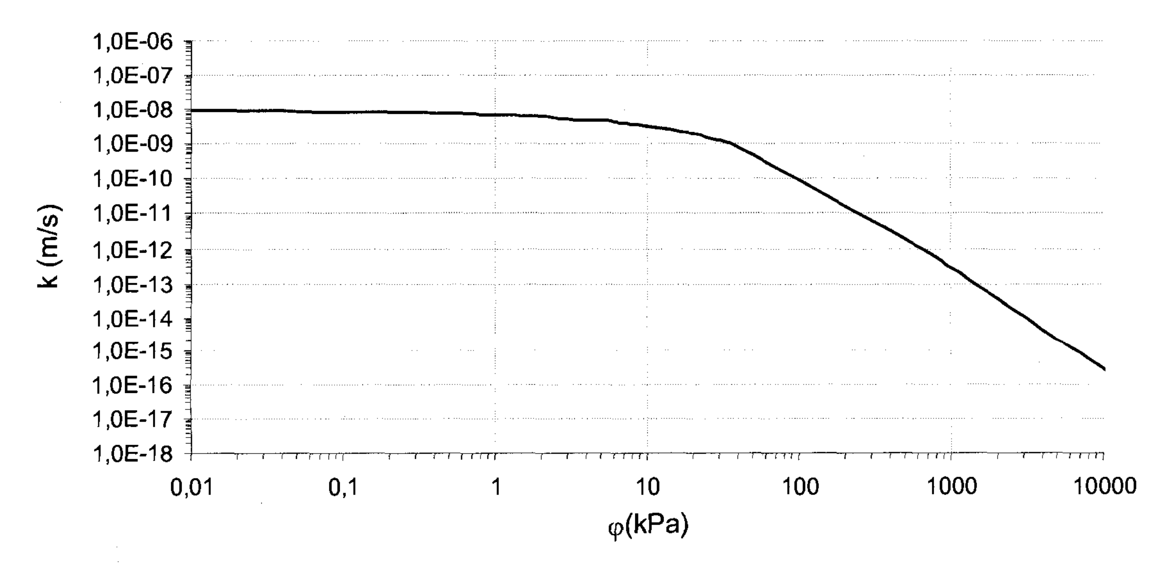


Figure 3-8 - FCH du SPD obtenue à l'aide de la CRE et du modèle de van Genuchten (1980)

3.1.5.2 Choix des matériaux pour la BC

Les choix des matériaux sont basés sur deux contraintes : la disponibilité des sols et la possibilité d'installer des instruments permettant de mesurer adéquatement les phénomènes étudiés d'écoulement dans les barrières capillaires inclinées. La méthode de Parent et Cabral (2006a) a été utilisée pour la sélection des matériaux. Cette section présente les travaux réalisés par le groupe géoenvironnement de l'Université de Sherbrooke (Parent et al., 2006).

<u>Choix des matériaux pour la CRC</u>

Deux matériaux étaient disponibles :

- Le sable ST : un sable silteux que l'on retrouve en grande quantité sur le site de Saint-Tite-des-Caps.
- Le sable classe A : un sable fourni par Vantal et fils, un entrepreneur de la région, et provenant de la carrière Ladufo.

Le matériau doit être choisi en fonction de sa possibilité à mesurer les infiltrations à travers la couche de SPD à l'aide d'un lysimètre.

Les CRE et les FCH de ces deux sables ont été obtenues grâce à la banque de données UNSODA, à partir de sols de granulométries similaires. La banque de données UNSODA comprend des données de laboratoire et de terrain. Des mesures assez continues sont disponibles pour le sable ST. Une extrapolation de la FCH a toutefois été nécessaire. Quant au sable de classe A, les mesures d'UNSODA sont sous forme de nuages de points. L'utilisation d'un modèle a été nécessaire pour ajuster la courbe. Le modèle d'ajustement utilisé pour la CRE est celui de Fredlund et Xing (1994), tandis que celui utilisé pour ajuster la FCH est celui de van Genuchten (1980). Les valeurs de k_{sat} et de la porosité du sable classe A ne sont pas clairement définies par les données de la CRE et de la FCH. Une prédiction de ces paramètres est donc effectuée, grâce au réseau neuronal du code RETC, par l'intermédiaire des pourcentages en sable (96,68 %), silt (2,48 %) et argile (0,84 %) de ce sable. Les CRE et FCH des deux sables sont présentées à la Figure 3-9 et à la Figure 3-10.

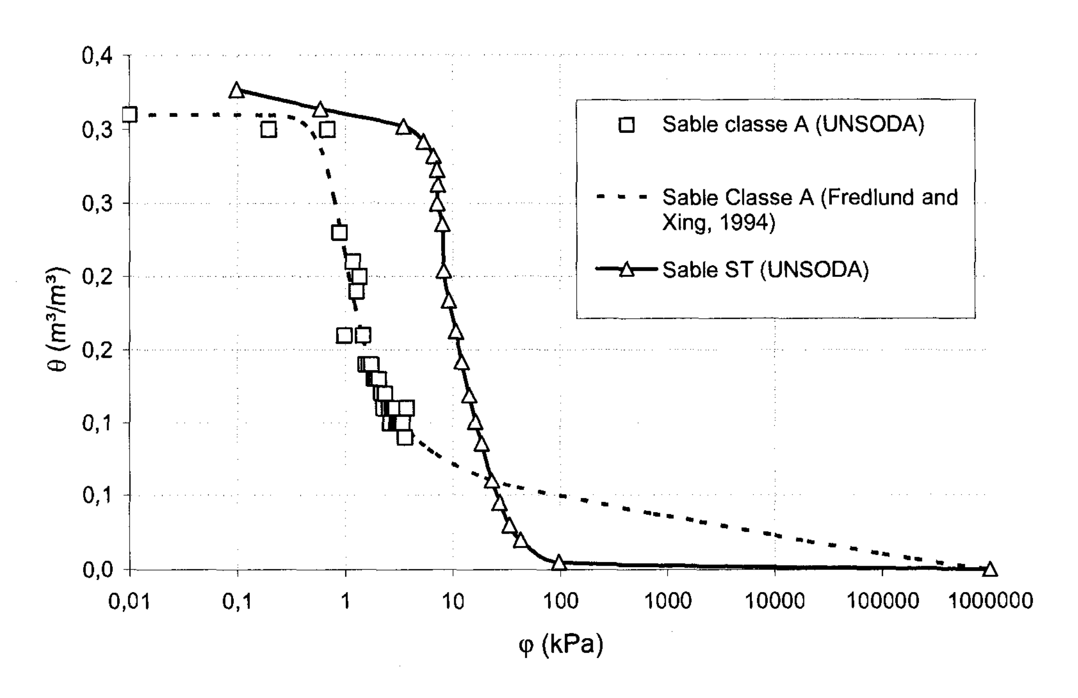


Figure 3-9 - CRE du sable Classe A (UNSODA et (Fredlund et Xing 1994)) et du sable ST (UNSODA) (Parent et al., 2006)

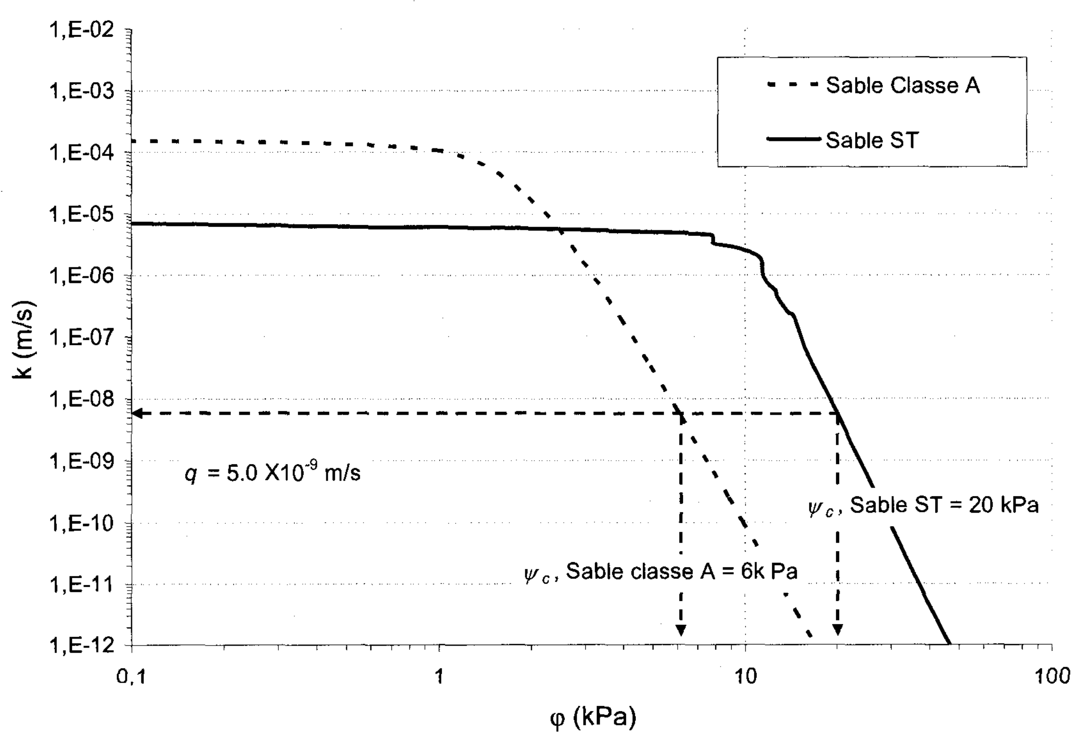


Figure 3-10 - FCH du sable classe A (UNSODA et van Genuchten (1980)) et du sable ST (UNSODA, avec extrapolation) (Parent et al., 2006)

La barrière capillaire de Saint-Tite-des-Caps est conçue de sorte à obtenir une longueur de transfert tout juste en deçà de 30 mètres pour un débit de percolation traversant le SPD et atteignant le sable de 5x10^{-9} m/s. Ce critère de conception est basé sur une simulation avec le logiciel Visual HELP pour un SPD dont la k_{sat} est de 1x10^{-8} m/s, 85% des débits de sollicitations arrivant au sommet de la BC varient entre 5x10^{-9} m/s et 1x10^{-8} m/. Pour le débit de percolation de 5x10^{-9} m/s, on obtient des succions de 20 kPa pour le sable ST et de 6,2 kPa pour le sable classe A (Figure 3-10). Le choix du sable classe A pour la CRC a été fait parce qu'avec des succions plus faibles, le lysimètre (présenté à la section 3.1.6.4), l'un des instruments de suivi le plus important, pouvait être fonctionnel avec des parois de plus petites dimensions. En effet, si le sable ST avait été retenu, des lysimètres de 2 mètres de hauteur auraient été nécessaires, ce qui ne convenait pas à la géométrie du site. Le fondement de ce choix est expliqué en plus amples détails à la section 3.1.6.4.

Choix du matériau de la CBC

Le gravier a été choisi de façon à respecter les critères de filtre de Terzaghi, (Holtz et Kovacs, 1991) et les critères de perméabilité. Étant donné que les matériaux sont sous succion la plupart du temps, le critère de perméabilité n'a pas été pris en considération (Parent et al., 2006).

Critère de rétention

Ce critère, présenté à l'Équation 3-1 assure que les interstices de la CBC sont suffisamment petits pour empêcher les particules de la CRC d'être entraînées dans les interstices de la CBC pour ensuite les colmater. Le terme D_x réfère à une dimension des diamètres des grains du sol. Si les grains sont séparés par grosseur de leur diamètre, tous les grains dont leur diamètre est plus petit que D_x représentent x % de la masse totale du sol.

$$\frac{D_{15_{CBC}}}{D_{85_{CRC}}} \leq 5 \quad \text{et} \quad \frac{D_{50_{CBC}}}{D_{50_{CRC}}} \leq 25$$

Équation 3-1

- Le sable classe A, formant la CRC, a un D_{85} de 1,4 millimètre. Le D_{15} du matériau de la CBC devra être plus petit ou égal à 7,0 millimètre.
- Le sable classe A a un D_{50} de 0,59 millimètre. Le D_{50} du matériau de la CBC devra être plus petit ou égal à 14,8 millimètres.

Le fuseau pour la granulométrie du gravier, tracé grâce au modèle de Fredlund et al. (2000), est présenté à la Figure 3-11. Cette figure présente aussi la granulométrie du Gravier Ladufo, un des graviers à l'étude. La limite minimale de la granulométrie du gravier est représentée, à la Figure 3-11, par la granulométrie du sable classe A.

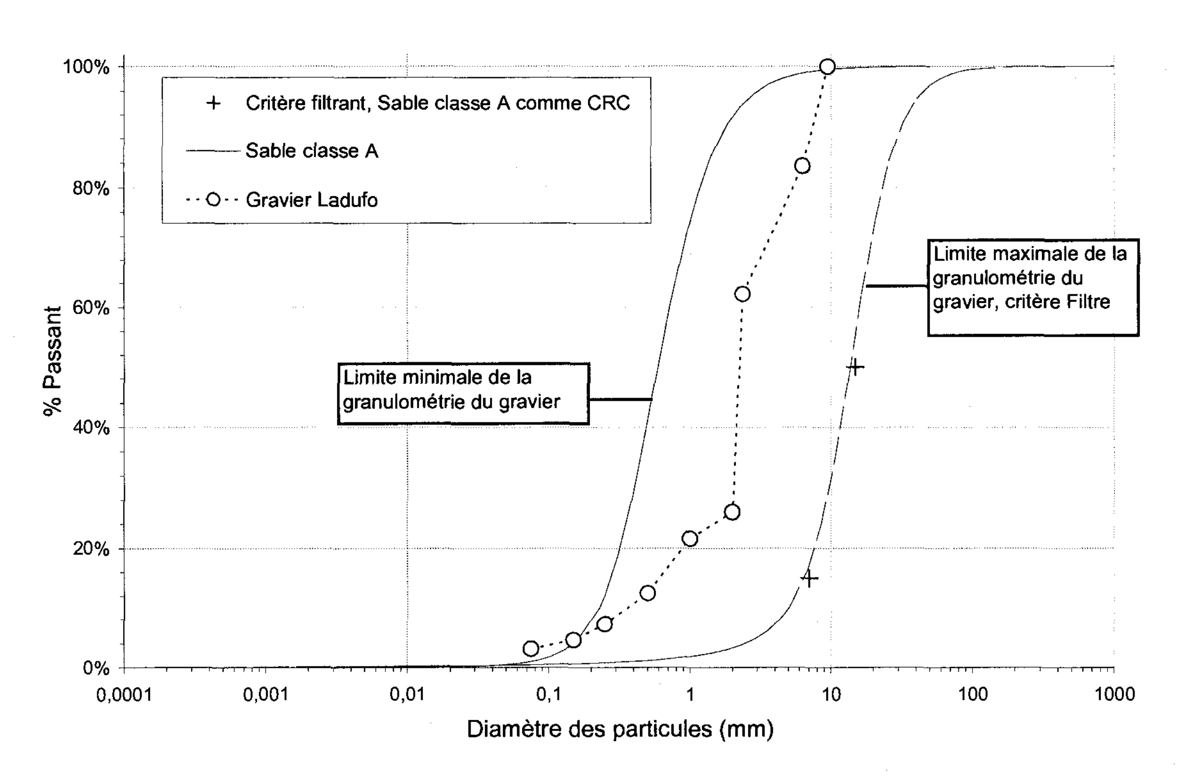


Figure 3-11 - Fuseau approximatif pour le gravier selon les critères des filtres, gravier Ladufo à l'étude (Parent et al., 2006)

Pour préciser le choix du matériau constituant la CBC, des simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel SEEP/W, logiciel qui sera présenté à la section 3.3.2. Des BC avec combinaison du sable classe A et deux types de gravier ont été testées. Le premier gravier est celui provenant de la carrière Ladufo et présentant une granulométrie intermédiaire entre le critère de filtre et le sable classe A (Figure 3-11). Le deuxième gravier est un gravier ayant

une granulométrie plus grossière que celle du gravier intermédiaire. Les résultats sont présentés à la Figure 3-12. Le débit de percolation à travers le SPD a été évalué, çi-haut, à q = 5x10^{-9} m/s. La méthode de Parent et Cabral (2006a) (Équation 2-17), expliquée au chapitre 2, permet de calibrer ce débit, au modèle de Ross (1990), à q = 7,8 x10^{-9} m/s. Avec cette valeur, la barrière capillaire composée de sable classe A et du gravier intermédiaire donne une longueur de transfert de 31 mètres, alors que le duo sable classe A et gravier grossier donne une longueur de transfert de 100 mètres, ce qui dépasse de beaucoup la longueur prévue de la cellule expérimentale de Saint-Tite-des-Caps. Le gravier intermédiaire, provenant de la carrière Ladufo, a donc été retenu pour la conception du recouvrement alternatif.

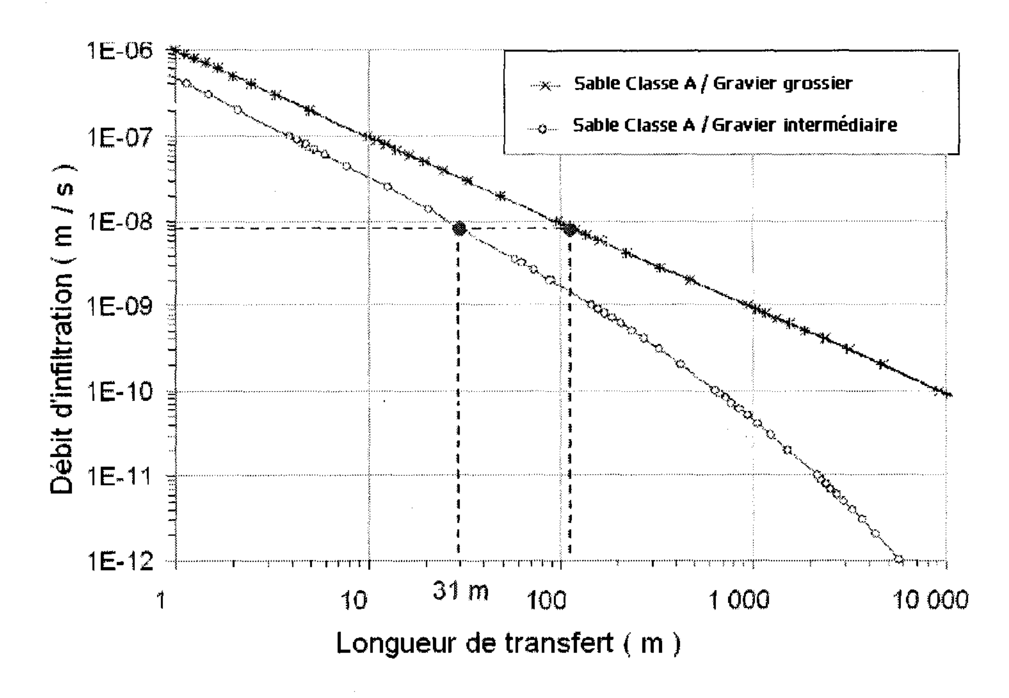


Figure 3-12 - Simulation numérique de la LT à partir de plusieurs valeurs d'infiltration (Parent et al., 2006)

3.1.5.3 Choix des épaisseurs des matériaux

- Épaisseur de la barrière hydraulique

Selon l'article 50 du REIMR (Gouvernement du Québec, 2008), la couche imperméable (couche no 2, Figure 2-8) du recouvrement doit être : «constituée soit de sol ayant en permanence une conductivité hydraulique maximale de 1x10^{-5} cm/s sur une épaisseur

minimale de 45 cm après compactage, soit d'une géomembrane ayant une épaisseur minimale de 1 mm». Dans le but de présenter un recouvrement alternatif qui présenterait éventuellement une faisabilité législative et en tenant compte de la perte de masse possible des SPD par biodégradation (Aït-Benichou et al. 2006, Panarotto et al. 2005), le choix de 60 cm d'épaisseur pour la barrière hydraulique constituée par les SPD a été retenu.

➢ Épaisseur de la CRC

Pour déterminer l'épaisseur de la couche de CRC, composée de sable classe A, des calculs présentés par Parent et Cabral (2006) ont été réalisés et présentés par Parent et al. (2006). Pour un débit de percolation du SPD de 5×10^{-9} m/s, et pour une longueur de transfert de 30 mètres (de façon à obtenir une longueur inférieure à celle de la cellule expérimentale), l'épaisseur doit être de 0,40 mètre, tel qu'indiqué à la Figure 3-13. Selon la méthode de conception expliquée par Parent et Cabral (2006a), il aurait fallu utiliser un débit un peu plus élevé, soit celui calibré de $7,8\text{x}10^{-9}$ m/s. Une discussion sur cet aspect sera réalisée au chapitre 5.

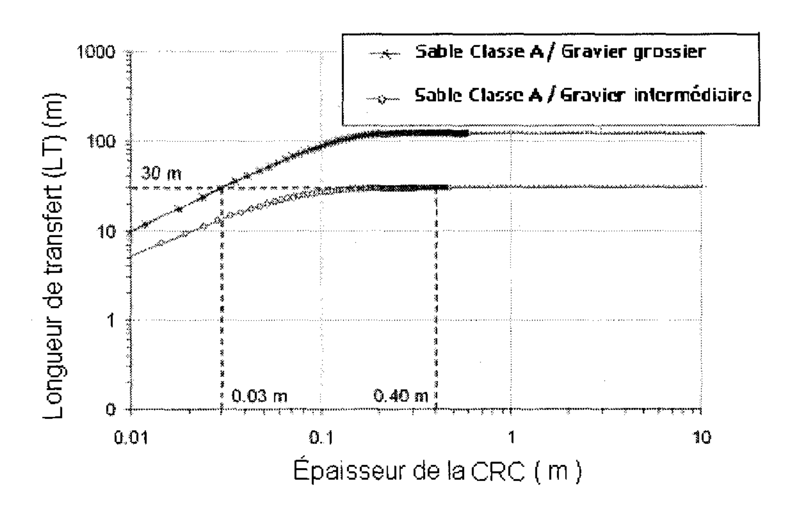


Figure 3-13 - Simulation numérique de la longueur de transfert en fonction de l'épaisseur de la CRC (Parent et al., 2006)

➢ Épaisseur de la CBC

Comme le mentionnent Parent et Cabral (2006a), l'épaisseur minimale de la CBC est celle correspondant à l'atteinte de la succion de convergence dans un profil de succion dont la condition limite inférieure est la plus désavantageuse, soit la présence d'une nappe phréatique.

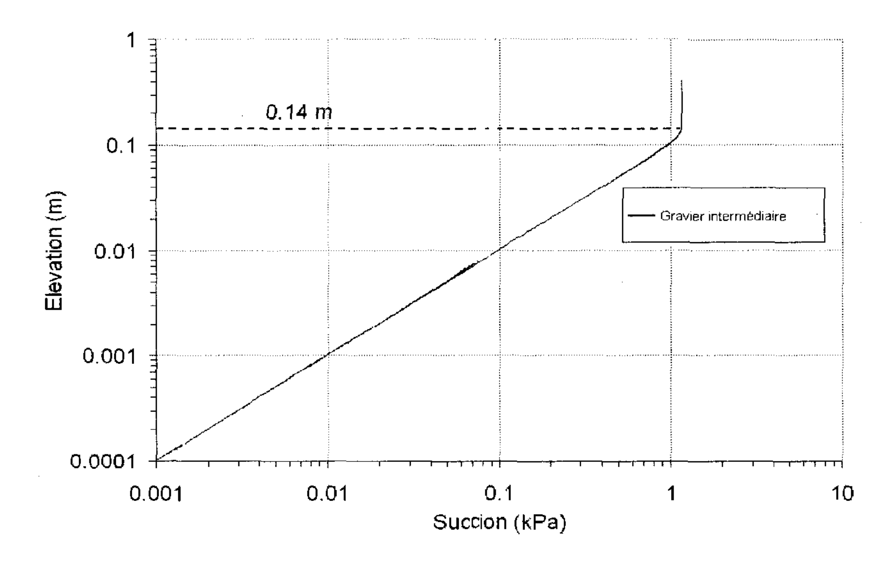


Figure 3-14 - Profils de succion dans le gravier (Kisch, 1959) (Parent et al, 2006)

Le modèle de Kisch (1959) est utilisé pour représenter le profil de succion pour le gravier intermédiaire (Figure 3-14), pour un débit d'infiltration corrigé de $q=7{,}8 \times 10^{-9}$ m/s (section 3.1.5.2). Comme il est indiqué à la Figure 3-14, cette analyse donne une épaisseur de 0,14 mètre. Pour des contraintes de construction, la valeur retenue pour le *design* est de 0,2 mètre.

3.1.5.4 Objectif de performance du recouvrement alternatif et révision du **design** *réalisé en 2005*

Puisque le débit de sollicitation retenu pour la conception est de 5×10^{-9} m/s, le recouvrement alternatif remplira son objectif si le débit percolant dans le gravier, à la fin de la BC – soit à 30 mètres – est inférieur à ce débit. En d'autres mots, si le lysimètre le plus en aval dans le gravier récolte un débit inférieur à 5×10^{-9} m/s, le recouvrement alternatif remplira l'objectif visé. De plus, une discussion du *design* et de certains problèmes et limitations identifiés sera réalisée au chapitre 5. Malgré tout, un des principaux paramètres de cette modélisation, la LT, s'est avéré relativement juste.

3.1.6 Instrumentation sur le terrain

La Figure 3-3 présente la position des instruments de la CEBC.

3.1.6.1 Objectifs principaux de l'instrumentation

Pour suivre le comportement du recouvrement alternatif, il faut une instrumentation adéquate. Le Tableau 3-2 présente un sommaire des instruments et de leurs fonctions. De plus, un sommaire des abréviations et des positions des instruments est présenté à l'annexe B.

3.1.6.2 Tensiomètres

L'eau dans le matériau poreux exerce une succion sur l'eau qui sature le bout d'un tensiomètre, composé d'une pierre poreuse. Cette succion est transmise à une membrane qui se déforme selon la succion et une jauge transmet à l'acquisiteur de données une différence de potentiel qui varie selon la déformation de la membrane (Figure 3-15). C'est ce principe qui est utilisé pour les tensiomètres de marque T4 et ceux de marque Irromètre.

- Tensiomètre de type T4

Les tensiomètres T4 sont fabriqués par la compagnie USM GmbH (USM GmbH, 2001). Les données transmises par les T4 sont enregistrées dans un acquisiteur de données nommé DL6. Le transducteur se trouve juste au-dessus de la pierre poreuse en céramique, il est donc enterré avec le tensiomètre. La saturation de la pierre poreuse est effectuée via deux conduites : l'une amenant l'eau jusqu'à la pierre, l'autre pour le retour de l'eau. L'intervalle de mesure et la précision de ces instruments sont présentés à l'annexe C.

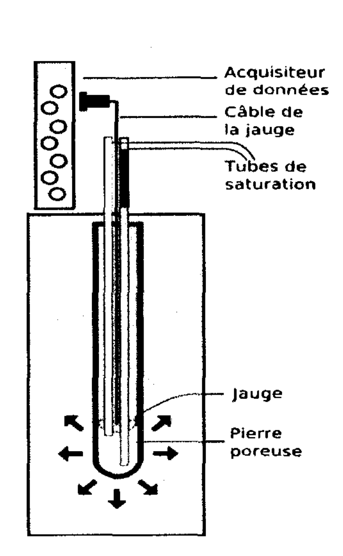


Figure 3-15 - Schéma d'un tensiomètre T4 installé dans le recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps (Parent et al., 2006)

Tableau 3-2 - Sommaire des instruments et de leurs fonctions

Endroit	Quantité	Nom	Fonction
Type d'instrument: Tensiomètre			
Interface sable – gravier	8	TEN-S/G-1 à 4, Irromètre automatique 1, 4,5 et 6	À l'interface d'une barrière capillaire, la succion diminue en bas de pente jusqu'à se stabiliser lorsque la capacité de transfert est atteinte. Les mesures à cette interface permettent donc de vérifier l'atteinte de la capacité de transfert.
Interface SPD – sable	5	TEN-S/SPD-1 à 3, Irromètre automatique no 2 et 3	La teneur en eau à la base de la couche de SPD devrait être proche de la saturation, afin d'éviter les émissions fugitives de méthane. Les tensiomètres permettent de déterminer la teneur en eau via la courbe de rétention d'eau à cet endroit. De plus, des mesures de teneur en eau couplées avec ces mesures de succion permettront de reconstituer la courbe de rétention d'eau du SPD.
SPD	3	Irromètre mécanique A et B, TEN-SPD-1	Le SPD, étant une barrière hydraulique, doit rester proche de la saturation. De faibles succions mesurées par des tensiomètres positionnés dans cette couche va permettre de vérifier si le SPD rempli son rôle.
Lysimètre sable 2	2	TEN-LYS-2H et 2B	Pour fonctionner adéquatement, la succion à la base d'un lysimètre devrait être nulle et la succion au sommet du lysimètre devrait être égale à la succion ambiante du matériau poreux. Deux tensiomètres, placés dans le lysimètre LYS-SAB-2, mesurent ces succions afin de vérifier le bon fonctionnement du lysimètre.
Type d'instrument: Lysimètre			
Endroit	**Quantité**	**Nom**	**Fonction**
Sable	3	Lysimètre sable 1 à 3	Mesurer la quantité d'eau percolant au travers le SPD.
Gravier	3	Lysimètre gravier 1 à 3	Mesurer la quantité d'eau infiltrant le gravier, et ainsi percolant dans les déchets.
Type d'instrument: Sonde de teneur en eau			
Endroit	**Quantité**	**Nom**	**Fonction**
SPD	10	Sondes ECH20	Les mesures de teneurs en eau couplées avec des mesures de succion permettront de reconstituer la courbe de rétention d'eau du SPD. De plus, la teneur en eau à la base de la couche de SPD devrait être proche de la saturation, afin d'éviter les émissions fugitives de méthane. Les sondes de teneurs en eau permettent donc de vérifier si le SPD rempli son rôle.
Type d'instrument: Plaque de tassement			
Endroit	**Quantité**	**Nom**	**Fonction**
SPD	3	Plaque de tassement no 1 à 3	Permet de quantifier le tassement du SPD et ainsi d'estimer la variation des propriétés hydrauliques et géotechniques de ce matériau dans le temps.
Type d'instrument: Station météo			
Endroit	**Quantité**	**Nom**	**Fonction**
Hors cellule	1	Station météo	Quantifier les sollicitations météorologiques, nécessaires entre autres à la modélisation.
Type d'instrument: Infiltromètre			
Endroit	**Quantité**	**Nom**	**Fonction**
Hors cellule	1	Infiltromètre Mini-Disk	Mesurer, ponctuellement, la conductivité hydraulique saturée du SPD

Une calibration reliant les données brutes (en millivolt, mV) avec les succions (kPa) a été nécessaire. L'annexe D présente les détails de cette calibration. Le résultat de cette dernière est résumé par l'Équation 3-2 :

φ (kPa)= 0.1*valeurs brutes (mV) **Équation 3-2**

- Tensiomètre de marque Irromètre

Les Irromètres sont fabriqués par la compagnie Irrometer Co. (Irrometer CO., 2008). Les données acquises par les Irromètres automatiques (Figure 3-16) sont enregistrées dans un acquisiteur de données de type Watermark. Cependant, les Irromètres mécaniques (Figure 3-17) ne possèdent pas d'acquisiteur de données. Pour ces deux types d'Irromètres, le transducteur se trouve au sommet du tensiomètre, ce dernier n'est donc pas enterré. La saturation de la pierre poreuse doit d'abord se faire en laboratoire et doit, par la suite, être entretenue sur le terrain en rajoutant de l'eau dans le réservoir par le sommet du tensiomètre. L'intervalle de mesure et la précision de ces instruments sont présentés à l'annexe C.



Figure 3-16 - Un des Irromètres automatiques installés dans le recouvrement alternatif de Saint-Tite-des-Caps

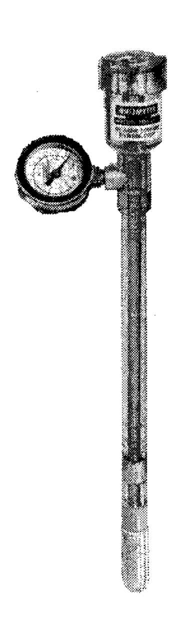


Figure 3-17 - Irromètre mécanique utilisé à Saint-Tite-des-Caps (Irrometer CO., 2008)

La conversion entre les valeurs brutes (mV) et les succions (kPa) se fait automatiquement par l'acquisiteur de données Watermark. Tous les Irromètres ont tout de même été testés en laboratoire. Un de ceux-ci, l'Irromètre automatique n° 4, présentait une calibration trop erronée pour obtenir la précision voulue. Des essais supplémentaires ont été réalisés sur ce tensiomètre – voir l'annexe E. Un facteur de 1,14 doit être appliqué à la succion brute pour obtenir la véritable succion.

3.1.6.3 Sondes de teneur en eau

Des sondes ECH$_2$O de type EC-5 de l'entreprise Decagon (Decagon Devices, 2006) ont été installées en 2006 pour palier au mauvais fonctionnement des sondes TDR (*Time-Domain Reflectometry*) installées lors de la construction. Les sondes TDR ne seront pas prises en compte dans ce mémoire. En effet, seules les sondes ECH$_2$O, qui sont des sondes diélectriques, seront considérées. Ces dernières sondes sont installées dans la couche de SPD, en 3 profils. Une sonde EC-5 mesure la différence de potentiel entre les deux pointes de la sonde (Figure 3-18). La variation de la teneur en eau va entraîner une variation de la mesure de cette différence de potentiel. Les données sont emmagasinées dans des acquisiteurs de données de marque EM50. L'intervalle de mesure et la précision de ces sondes sont présentés à l'annexe C.

Une courbe de calibration a été obtenue en laboratoire pour convertir les valeurs brutes (mv) en teneur en eau volumétrique. La densité visée est celle obtenue par des cônes de sable effectués sur la couche de 60 cm de SPD lors de la construction (soit 506 kg/m³, voir annexe A). Les résultats sont affichés à l'annexe F.

Figure 3-18 - Représentation d'une sonde de teneur en eau ECH20 utilisée à Saint-Tite-des-Caps
(Decagon Devices, 2006)

Par ailleurs, des travaux réalisés sur le ballon gonflable n° 3 lors de l'été 2007 ont permis d'effectuer des essais sur le terrain. Pour ce faire, un lecteur manuel (ECH_2O Check) a été utilisé pour l'obtention de 5 valeurs brutes (mV) entre 0 et 60 cm de profondeur par rapport au sommet du SPD. Pour chaque valeur prise de l'ECH_2O Check, un échantillon de SPD a été relevé pour réaliser une teneur en eau massique en laboratoire. Deux cônes de sables ont été effectués dans le trou du ballon gonflable n° 3, à 60 cm de profondeur par rapport au sommet du SPD (voir annexe A). La densité de 625 kg/m³ a été jugée représentative de la densité du SPD pour ces essais. Cette densité a été utilisée pour convertir les valeurs de teneur en eau massique en teneur en eau volumétrique.

Les résultats sont affichés à l'annexe F. Il est possible d'observer que les valeurs mesurées sur le terrain ne divergent pas de celles obtenues en laboratoire malgré la différence de masse volumique. La calibration retenue pour convertir les valeurs brutes des sondes ECH_20 en teneur en eau volumétrique est donc la régression effectuée sur les données expérimentales. C'est à dire :

$$\theta\ (m^3/m^3) = 6{,}10 \times 10^{-4} \times \text{valeur brute (mv)} + 0{,}0215$$ **Équation 3-3**

3.1.6.4 Lysimètres

Deux séries de lysimètres, de type zéro-tension (section 2.6.3) sont installées à Saint-Tite-des-Caps : une série dans le sable de 60 cm de hauteur et une série de 20 cm de hauteur, dans le gravier. Le diamètre de ces lysimètres est de 103 cm. La Figure 3-19 présente ces lysimètres lors de leur mise en place. La fiche technique de ces instruments est présentée à l'annexe G et la position de ces appareils, leur intervalle de mesure et leur précision, à l'annexe C.

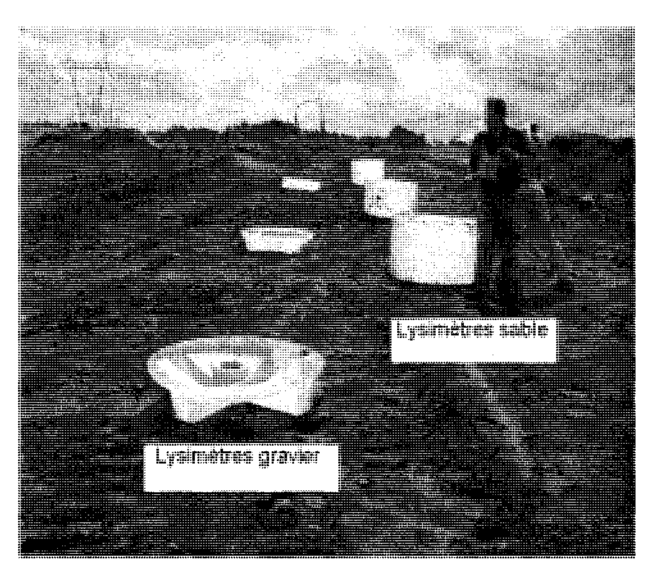


Figure 3-19 - Installation des lysimètres dans le sable et dans le gravier (Cabral et Bérubé, 2005)

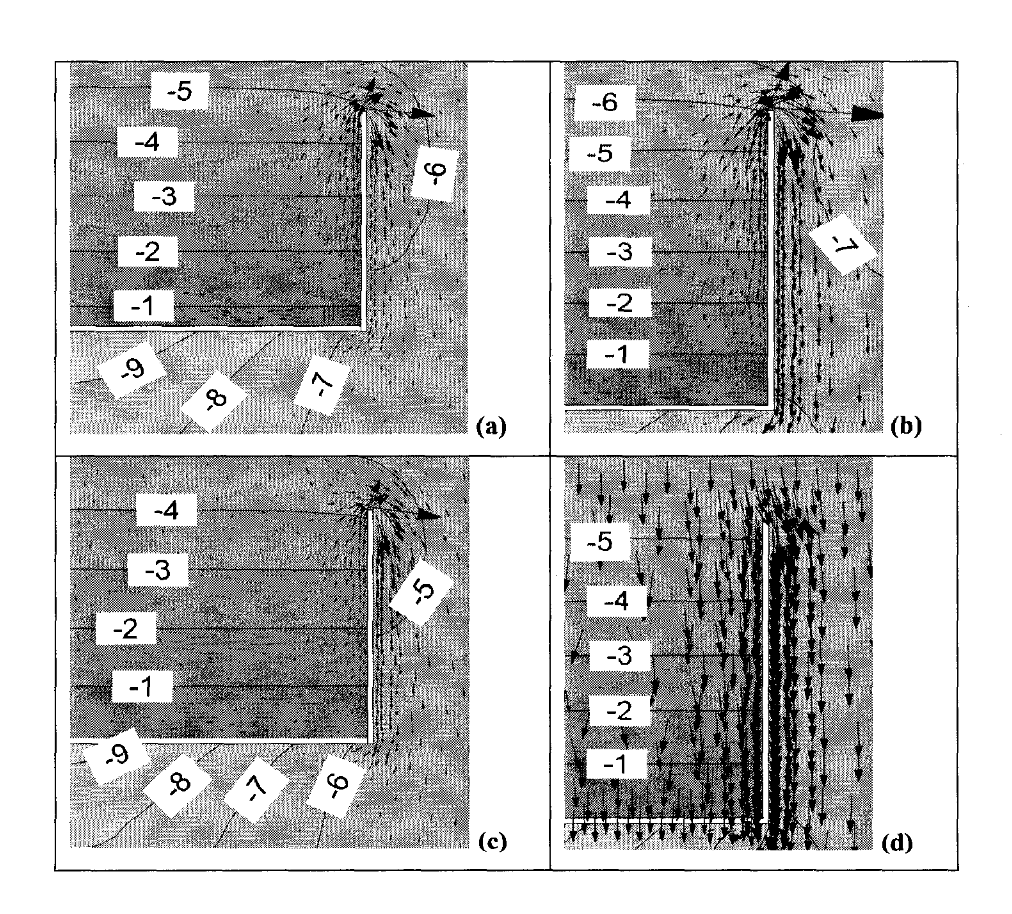


Figure 3-20 - Section transversale montrant les vecteurs d'écoulement et les iso-contours de pression (kPa) : (a) Lysimètre de 0,40 mètre (semaine sèche); (b) Lysimètre de 0,60 mètre (semaine sèche); (c) Lysimètre de 0,40 mètre (condition typique - 85 % du temps); (d) Lysimètre de 0,60 mètre (condition typique, 85 % du temps) (Parent et Cabral, 2006b).

Les principaux paramètres de *design* de ce type d'instrument sont la hauteur des parois et le débit de percolation, tel qu'expliqué à la section 2.6.3. Ainsi, dans le cadre de la conception des lysimètres de la cellule expérimentale de Saint-Tite-des-Caps, des simulations numériques utilisant SEEP/W (logiciel présenté à la section 3.3.2) ont été réalisées par Parent et Cabral (2006b) pour évaluer la performance des lysimètres installés dans les couches de sable et ceux dans le gravier (Figure 3-20), en fonction de ces deux paramètres. La conception de la barrière capillaire a limité l'épaisseur de la couche de sable à 0,40 mètre, bien que la hauteur requise pour les lysimètres dans ce matériau était de 0,60 mètre. Par conséquent, les lysimètres ont dû être prolongés sous l'interface de sable/gravier.

3.1.6.5 Plaques de tassement

Trois plaques de tassement ont été installées pour mesurer les changements d'épaisseur de la couche de SPD, et ainsi à suivre l'évolution de l'indice de vide et de la densité de ce matériau. Ces plaques de tassement sont composées de deux parties distinctes qui glissent l'une sur l'autre (parties A et B à la Figure 3-21). Les parties A et B sont constituées d'une plaque d'acier reliée à un cylindre métallique. L'affaissement du matériau situé entre les deux plaques (diminution de h2 à la Figure 3-21) peut être déterminé en mesurant h1. En effet, sachant que (h1 + h2) est une constante, h2 peut être déterminé en mesurant h1. Le tassement dans la barrière hydraulique constituée de SPD peut influencer le comportement hydrogéologique du recouvrement alternatif. Plus la couche des SPD sera dense, plus sa conductivité hydraulique saturée sera faible.

Ces plaques de tassement sont recouvertes en partie par des panneaux isolants, qui ont la fonction principale d'éviter la formation de glace sous la plaque de tassement durant l'hiver (plaque qui pourrait la soulever). Aussi, l'épaisseur de l'isolant a été calculée de façon à ce que l'ensemble plaque-isolant ait la même masse volumique que le sable. De cette façon, aucun tassement additionnel local n'est induit.

L'intervalle de mesure et la précision des plaques de tassement sont inscrits à l'annexe C.

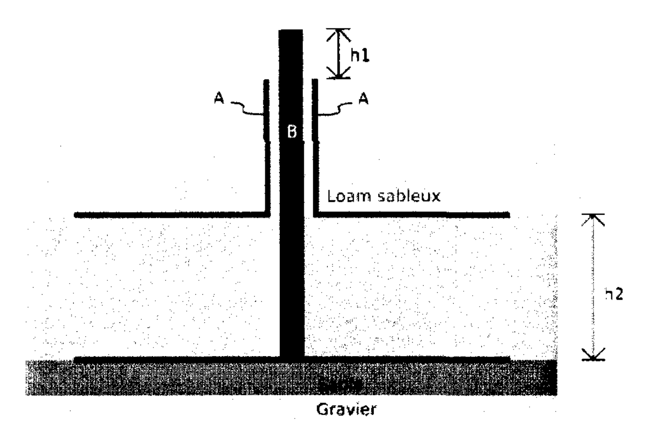


Figure 3-21 - Schéma des plaques de tassement à Saint-Tite-des-Caps (Parent et al., 2006)

3.1.6.6 Station météorologique

Une station météorologique de marque Vantage Pro, de la compagnie Davis (Davis Instruments, 2004) a été installée à environ 100 mètres de la cellule expérimentale de Saint Tite-des-Caps. Cette station sans fil comprend une suite intégrée de capteurs météo et une console de visualisation des données. Les données de la station météorologique permettent, principalement, d'établir un bilan hydrique du site. En ce sens, la station météorologique répond au besoin de quantifier les précipitations et les autres propriétés météorologiques nécessaires à la modélisation.

3.1.6.7 Infiltromètre

L'infiltromètre de type Mini Disk, conçu par la compagnie Decagon, permet de mesurer la conductivité hydraulique saturée d'un sol (Decagon, 2005). Ce type d'essai, présenté à la Figure 3-22 b) n'est pas normalisé. L'eau pénètre dans le sol non saturé à partir du moment où la succion dans le sol est supérieure à celle imposée à la base du mini disque. La Figure 3-22 a) illustre un essai sur le chantier. L'intervalle de mesure et la précision des plaques de tassement sont inscrits à l'annexe C.

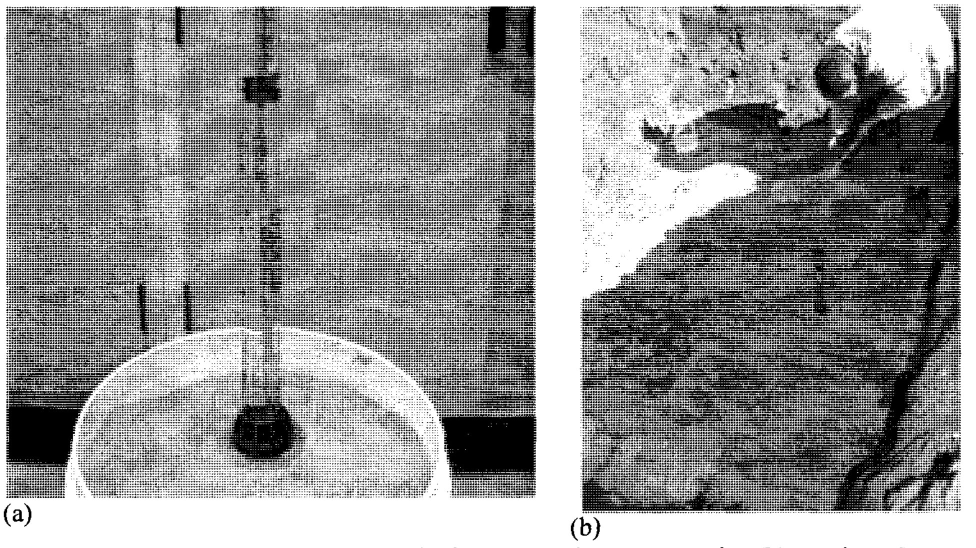

(a) (b)

Figure 3-22 - Infiltromètre de type Mini Disk (a) essai en laboratoire (b) essai sur le terrain

3.2 Laboratoire

Différents essais sont réalisés en laboratoire pour déterminer les propriétés hydrauliques et géotechniques des matériaux composant le recouvrement alternatif. Les propriétés hydrauliques évaluées expérimentalement sont les CRE. Les FCH peuvent être estimées à partir de ces CRE, tel que mentionné au chapitre 2. Les propriétés géotechniques ont déjà été obtenues en grande partie dans les travaux antérieurs (Cabral et Bérubé, 2006). Pour compléter ceux-ci, des granulométries ont été réalisées.

3.2.1 Granulométrie

Des essais de granulométrie ont été réalisés sur le sable classe A formant la CRC du recouvrement alternatif. Ces essais suivent la norme (Bureau de Normalisation du Québec, 2501-025, 1987). La Figure 3-23 présente les quatre analyses effectuées. Deux essais ont été réalisés sur un sable classe A échantillonné en 2007 et provenant de la même carrière ayant fourni le sable classe A lors de la construction. Un essai a été réalisé sur le sable classe A échantillonné sur le terrain en 2007 lors de la mise en place des Irromètres. Enfin, un dernier essai a été présenté ici, soit celui réalisé en 2005 sur le sable utilisé pour la construction.

Le modèle de Fredlund et al. (2000) est utilisé pour obtenir une régression sur la moyenne des 2 essais sur le sable Ladufo.

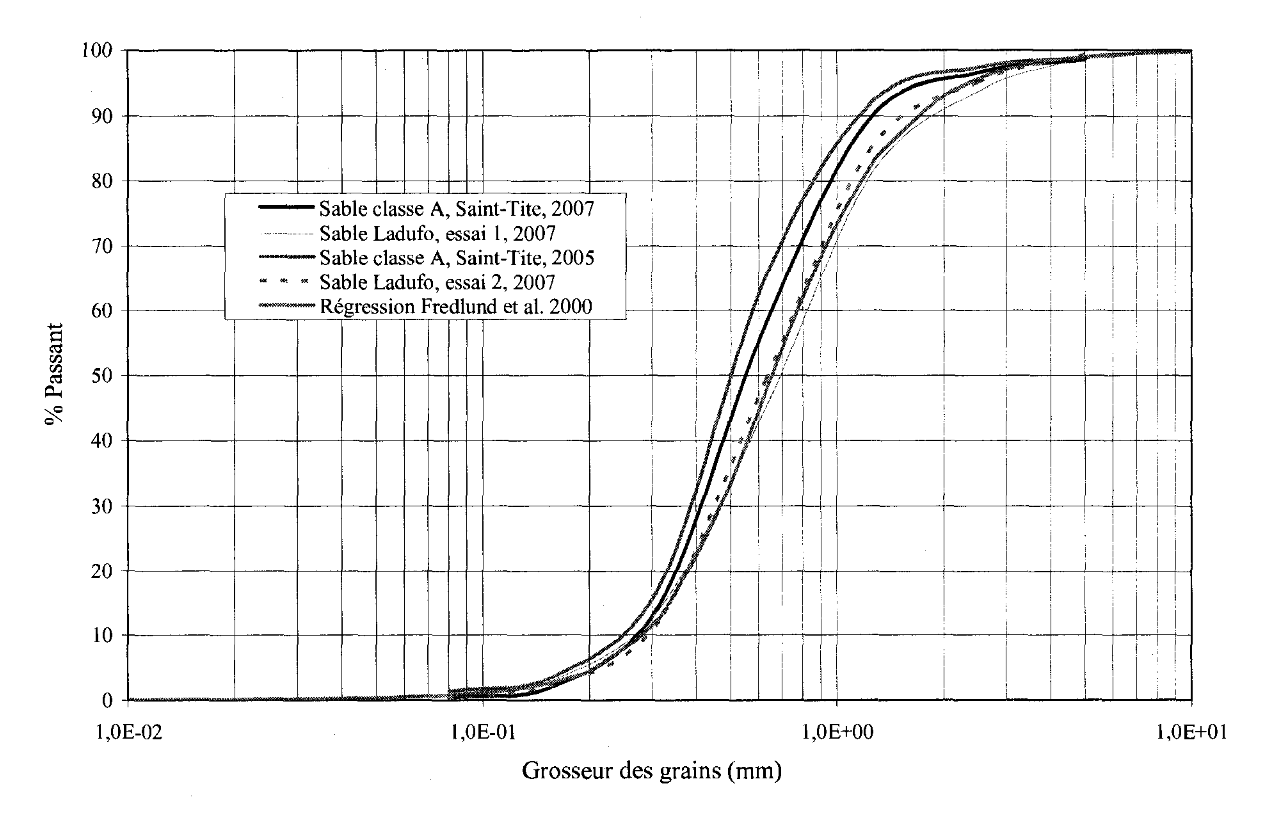


Figure 3-23 - Analyses granulométriques sur le sable classe A

3.2.2 Essais de colonne

Pour évaluer les CRE, une colonne verticale composée de section démontable peut être remplie du sol à évaluer. Une grande quantité d'eau est préalablement versée au sommet, en maintenant la sortie à la base fermée. Ainsi, initialement, le sol est amené le plus près possible de la saturation en eau. La sortie est par la suite ouverte et la colonne se draine pendant 2 à 3 jours. En maintenant la pression atmosphérique à la base de la colonne à l'aide d'un siphon et en maintenant une ouverture au sommet, la succion augmente en fonction de la hauteur, au taux de 9,81 kPa/m. La teneur en eau du sol va ainsi varier en fonction de la hauteur par rapport à la base. Ces teneurs en eau peuvent être mesurées, après stabilisation, en démontant la colonne et elles peuvent être associées aux succions pour évaluer la CRE. La Figure 3-24

présente le montage de cet essai ainsi que la variation de la teneur en eau avec la hauteur. L'annexe H présente le mode opératoire de cet essai.

La colonne est composée de moules circulaires en PVC. La hauteur moyenne de chaque moule est de 19,99 centimètres, pour une hauteur totale de près de 2 mètres, et le diamètre moyen est de 40,65 centimètres

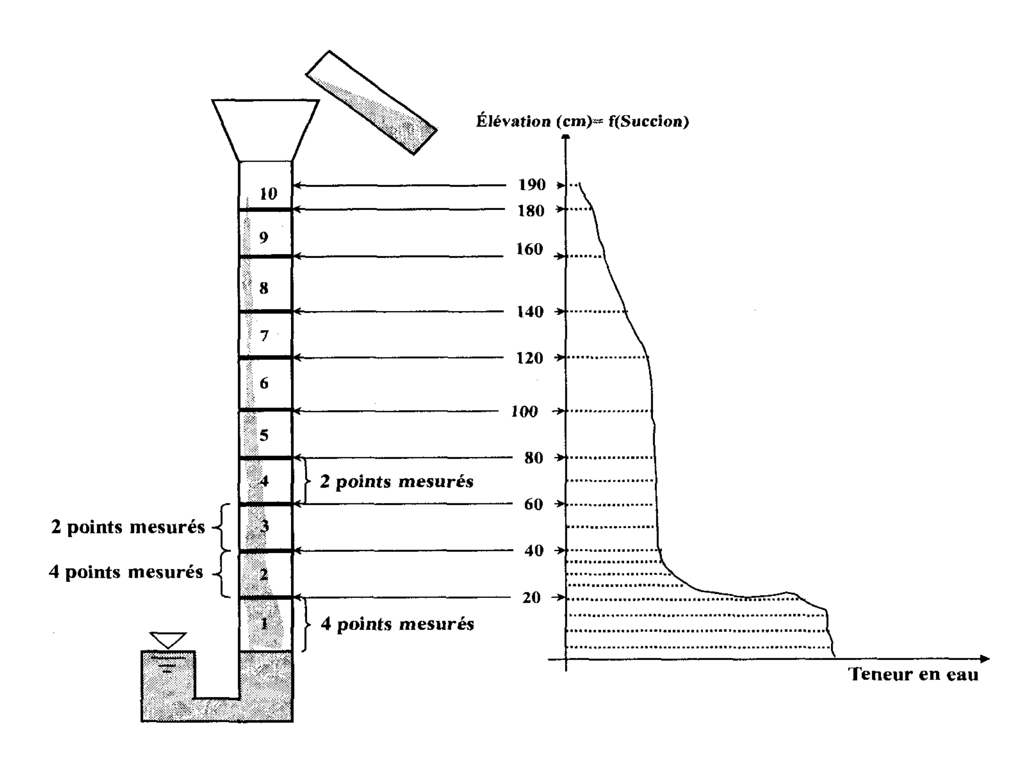


Figure 3-24 - Essai de colonne pour l'obtention d'une CRE

Deux essais sur une colonne de drainage ont été réalisés sur le sable classe A, un avec un drainage de 48 h, et l'autre avec un drainage de 72 h. Un seul essai a été réalisé pour le gravier. La densité retenue est la moyenne des cônes de sable effectués sur le terrain lors de la construction (soit 1650 kg/m³ pour le sable et 1900 kg/m³ pour le gravier). Les résultats de teneurs en eau en fonction des succions appliquées sont présentés à la Figure 3-25 et à la Figure 3-26.

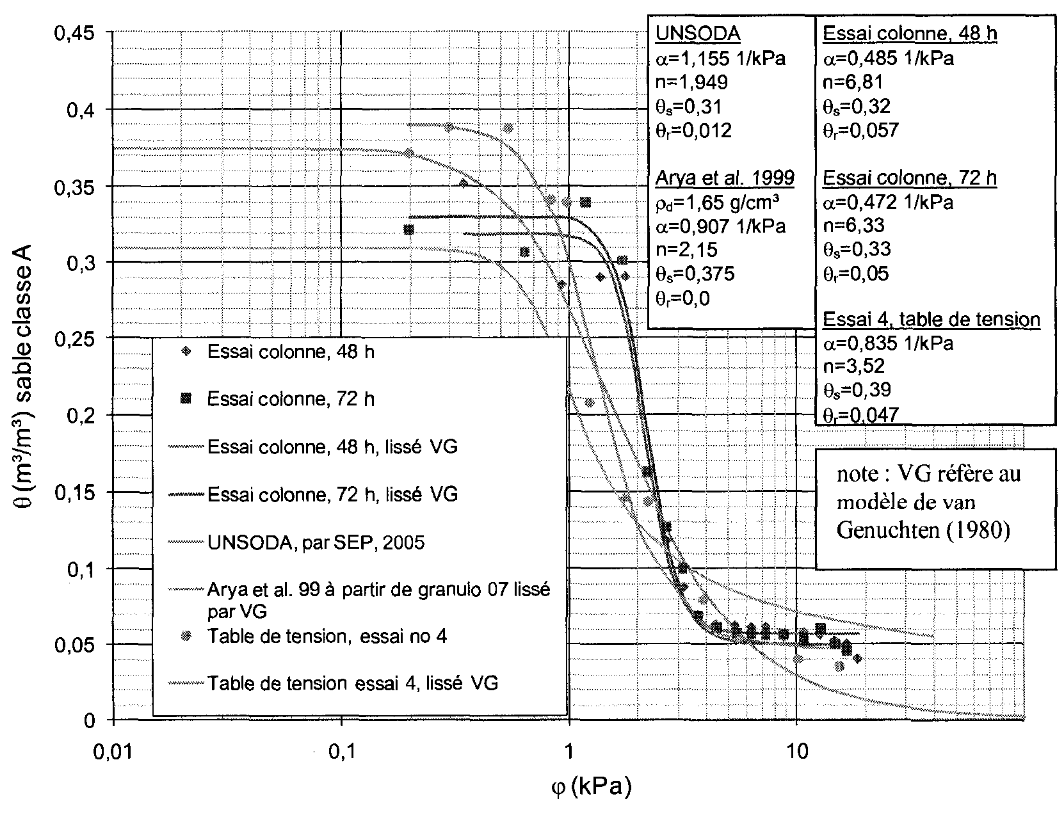


Figure 3-25 - CRE sable classe A, données expérimentales, banque de données UNSODA et régressions

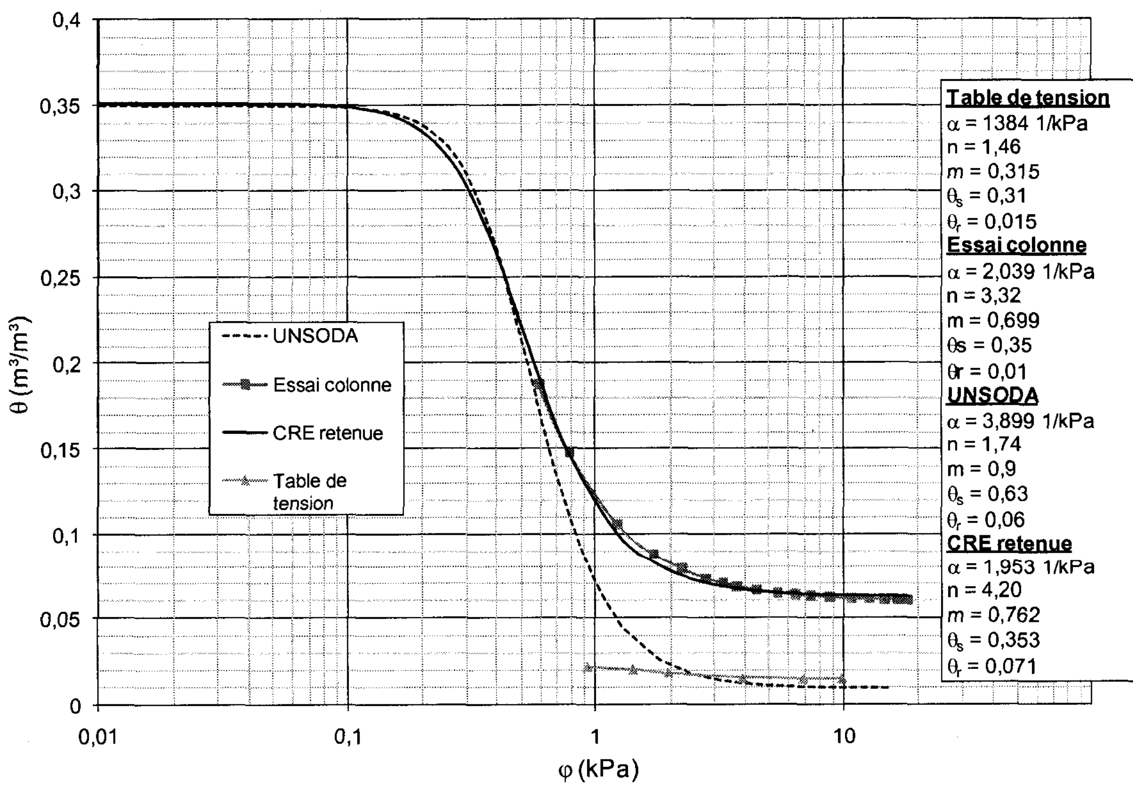


Figure 3-26 - CRE gravier, données expérimentales, banque de données UNSODA et régressions

3.2.3 Essai de table de tension

Un autre type d'essai est réalisé pour évaluer les CRE : la table de tension. Pour ce genre d'essai, un matériau poreux de faible perméabilité et ayant une VEA plus élevée que les sols à tester est utilisé comme pierre poreuse pour transmettre une succion à la base des échantillons. Pour les essais réalisés dans le cadre de ce projet, des micro-billes de verre de diamètre de 0,3 millimètre ont été utilisées comme matériaux poreux. La fiche technique de propriété de ce matériau est présentée à l'annexe J.

Différents échantillons peuvent être placés sur ce lit de billes de verre, voir la Figure 3-27. Les échantillons, d'un centimètre de hauteur, sont compactés dans des moules cylindriques en PVC de 2,59 centimètres de diamètre moyen. En dessous des échantillons, des filtres ont été placés pour éviter la perte de particules fines lors des essais. La succion peut être augmentée en abaissant un erlenmeyer par rapport aux échantillons, ce qui génère une pression négative (Figure 3-27). À chaque incrément de différence de hauteur, après stabilisation, la teneur en eau d'un échantillon peut être mesurée à l'étuve. Il est possible d'associer la succion (élévation de l'erlenmeyer par rapport à l'élévation médiane des échantillons) aux teneurs en eau pour obtenir les CRE. Le mode opératoire de cet essai est présenté à l'annexe I.

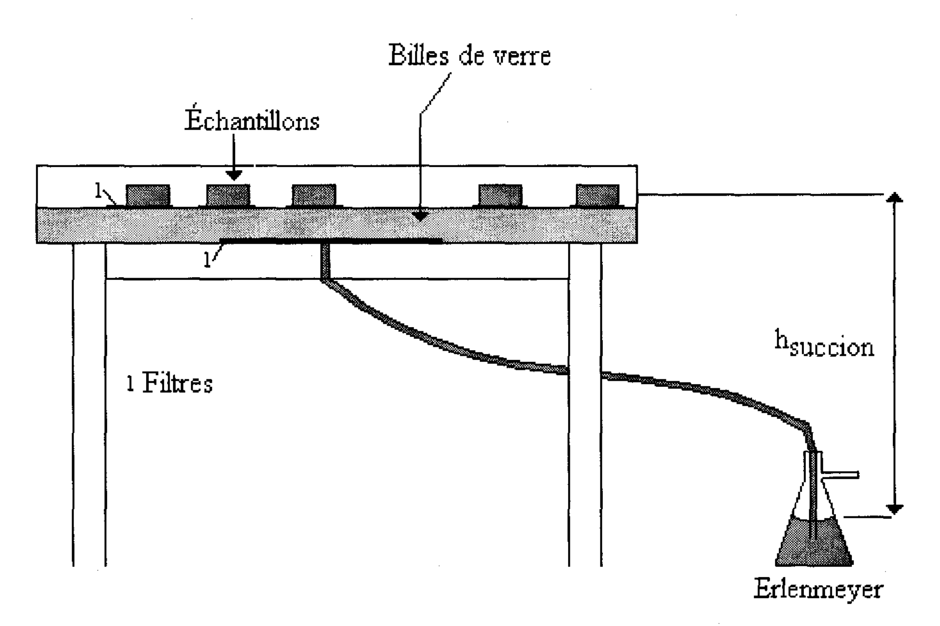


Figure 3-27 - Montage de l'essai : table de succion, échantillon et erlenmeyer

Un essai de table de tension a été réalisé pour chacun des matériaux de la BC. La densité retenue pour l'essai est la moyenne des cônes de sables réalisés sur le terrain (1650 kg/m^3 pour le sable et 1900 kg/m^3 pour le gravier). Les résultats de teneurs en eau en fonction des succions appliquées sont présentés à la Figure 3-25 et à la Figure 3-26. La Figure 3-25 présente aussi la CRE obtenue à partir de l'essai granulométrique réalisé en 2007, grâce au modèle Arya et al. (1999)

3.3 Logiciels de modélisation

3.3.1 Visual HELP

Le modèle HELP (Hydrologic Evaluation of Letfill Performance), utilisé par le logiciel Visual Help, permet de générer des bilans hydriques d'un recouvrement (WHI, 2000). Ce logiciel est conçu par la compagnie Waterloo Hydrogeologic inc. Le modèle HELP est prévu pour les sites d'enfouissement conventionnels : l'effet de barrière capillaire n'est pas pris en compte. HELP considère que la seule composante qui influence l'écoulement est la gravité et néglige ainsi les contraintes matricielles, qui peuvent être dominantes pour les sols partiellement saturés (Pease et Stormont, 1996). La version utilisée aux fins de ce mémoire est la version 2.2.0.1.

Le modèle HELP a ses limites (Çelik et al., 2007), mais il demeure très utilisé.

3.3.2 SEEP/W

SEEP/W est un logiciel produit par Géoslope International inc. Il est utilisé pour modéliser les écoulements et les distributions de pressions dans les milieux poreux grâce à des éléments finis. Il permet l'analyse bidimensionnelle et unidimensionnelle, permanente ou transitoire, à travers des milieux poreux partiellement saturés ou saturés. Les calculs d'écoulements sont basés sur la loi de Darcy. La méthode numérique de résolution est celle des éléments finis par l'approximation de Galerkin (Krahn, 2004). L'espace est *discrétisé* par un maillage rectangulaire et la résolution numérique s'effectue aux nœuds du maillage. La version Geostudio 2004 est utilisée dans ce présent projet.

3.3.3 Hydrus 3D

Le logiciel Hydrus 3D a été utilisé dans ce présent travail pour deux dimensions seulement. Hydrus-3D est un logiciel produit par PC Progress (Šimůnek et al. 2006). La version 1.03 de ce logiciel permet de simuler, entre autres, les écoulements d'eau dans un milieu poreux non saturé. Le modèle *discrétise* l'espace dans deux dimensions (ou trois dimensions) en éléments finis et il résout numériquement l'équation de Richards en régime transitoire. La méthode numérique de résolution est celle des éléments finis par l'approximation de Galerkin.

4 APPROCHE ET MÉTHODOLOGIE

La Figure 4-1 présente un organigramme expliquant la structure de la présentation des résultats, dans l'optique de répondre aux objectifs présentés au chapitre 1. Les cases vertes, bleues et grises correspondent, respectivement, aux activités réalisées en laboratoire, aux activités de simulations numériques et aux activités *in situ*. Les cases blanches présentent les différents objectifs du projet. Notons que l'objectif secondaire de la révision du design sera traité au chapitre 5, le chapitre 4 ne présente que les activés réalisées pour évaluer l'efficacité du recouvrement alternatif proposé.

En premier, les résultats dérivés de la caractérisation des matériaux, soit la régression des CRE, à partir des données expérimentales obtenues au chapitre 3, et l'obtention des FCH sont présentés. À partir de ces propriétés, le comportement théorique de la CEBC est évalué. Les données recueillies sur le terrain sont par la suite analysées. À la lumière des observations réalisées au laboratoire, il est possible de décrire le comportement observé, *in situ*, du recouvrement alternatif. Enfin, les simulations numériques de la CEBC, réalisées à partir entre autres des propriétés évaluées en laboratoire, permettent de quantifier la performance du recouvrement alternatif.

Enfin, ces efficacités théoriques, observées et modélisées sont comparées. À partir des observations du terrain, il est possible de mieux cibler les véritables propriétés hydrauliques des matériaux composant la CEBC.

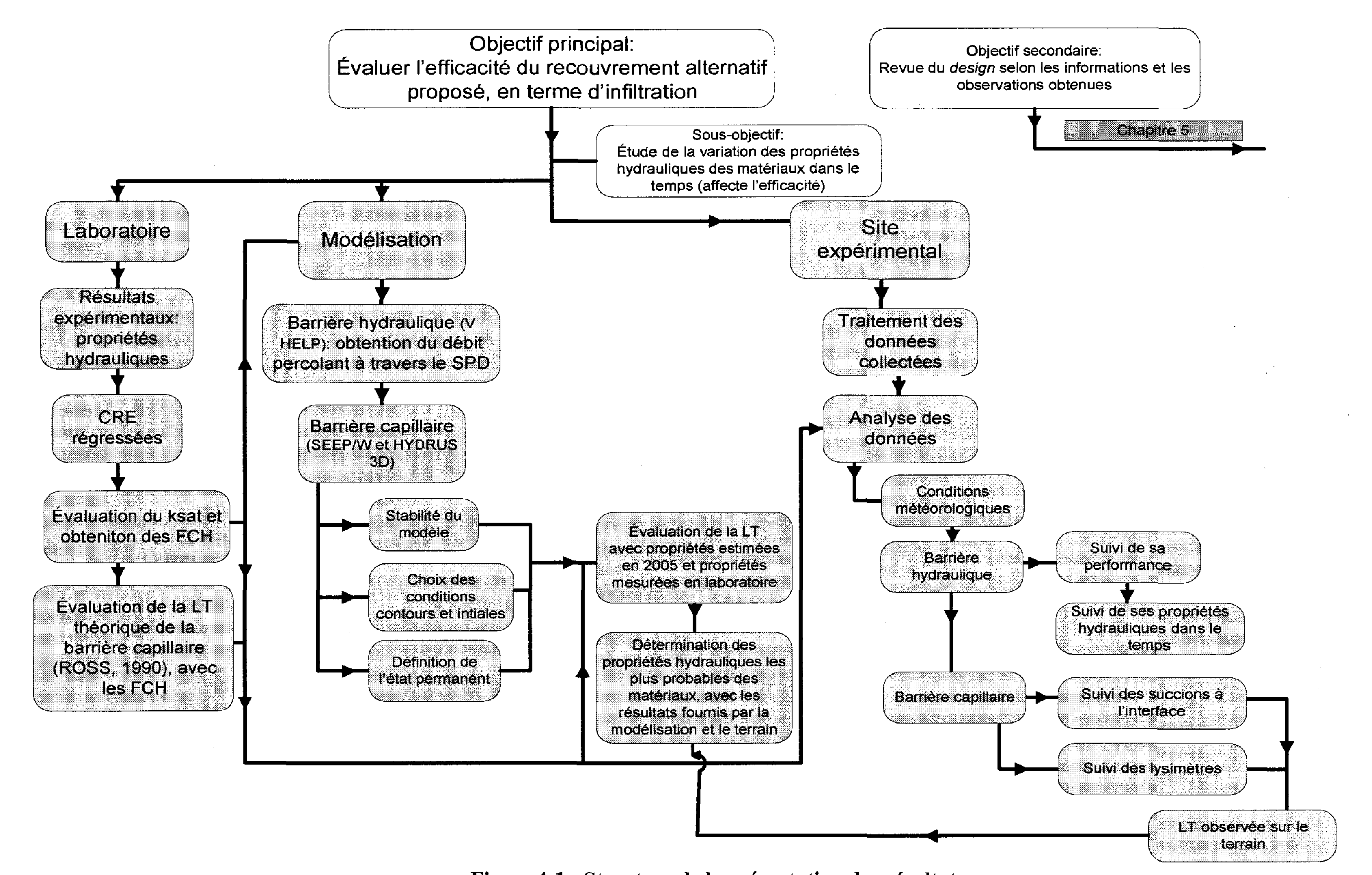


Figure 4-1 - Structure de la présentation des résultats

4.1 Caractérisation des matériaux

4.1.1 Courbes de rétention d'eau (CRE)

Une régression peut être obtenue à partir des données expérimentales, présentées au chapitre 3, de teneurs en eau en fonction des valeurs de succion, en utilisant un modèle comme celui de van Genuchten (1980) ou de Fredlund (1994) (Tableau 2-1). Le modèle retenu aux fins de ce mémoire est celui de van Genuchten (1980), car le logiciel Hydrus ne permet pas l'utilisation de celui de Fredlund et Xing (1994). De plus, le modèle de van Genuchten (1980) fournit un ajustement plus adéquat des données expérimentales que les modèles de Brooks et Corey (1964) et de Garden (1958).

Dans les prochaines sections, les paramètres du modèle de van Genuchten (1980) sont ajustés de telle sorte la somme du carré des écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs lissées est minimisée.

4.1.1.1 CRE obtenue à partir des granulométries

À partir de la courbe granulométrique du sable classe A obtenue par le modèle de Fredlund et al (2000) (section 3.2.1), il est possible d'estimer la CRE du sable classe A à l'aide du modèle d'Arya et al. (1999), via le programme Scilab (voir la section 2.3). Le code, utilisé pour la compilation, a été développé par le groupe de recherche en géoenvironnement de l'Université de Sherbrooke. Ce dernier est présenté à l'annexe K. La masse volumique retenue est la moyenne de quatre cônes de sable réalisés lors de la construction : 1650 kg/m^3.

Les données fournies par le modèle Arya et al. (1999) sont sous la forme d'une série de points. Il est donc nécessaire d'appliquer le modèle de van Genuchten (1980) pour obtenir une régression adéquate. Le résultat obtenu est présenté à la Figure 3-25, sous le titre *Granulométie 2007, Arya et al. lissé par VG.* De plus, les paramètres de van Genuchten (1980), minimisant la somme des carrées des écarts entre les données expérimentales et les données lissées, sont inscrits à la Figure 3-25.

4.1.1.2 CRE obtenue à partir des essais de colonne de drainage et de table de tensions

Le modèle de van Genuchten (1980) peut encore être utilisé pour lisser les CRE à partir des données expérimentales (essais de table de tension et de colonne de drainage pour le sable et pour le gravier). Les régressions et les paramètres de ce modèle minimisant la somme du carré des erreurs, pour les essais expérimentaux, sont présentés à la Figure 3-25 et à la Figure 3-26.

De plus, la Figure 3-25 présente la CRE du sable classe A estimé lors de la conception via la base de données UNSODA (USDA, 1999). Le modèle retenu à l'époque pour obtenir la régression était celui de Fredlund et Xing (1994). Les paramètres de van Genuchten (1980) ont, encore, été obtenus par la minimisation de la somme des carrées des écarts entre les données expérimentales et les données lissées. Il est possible de conclure que la CRE estimée lors de la conception a une teneur en eau volumétrique à saturation (θ_{sat}) moins élevée que celles calculées en laboratoire. De plus, la pente de désaturation estimée lors de la conception est moins élevée que celles observées expérimentalement.

Enfin, la Figure 3-26 présente aussi la CRE estimée du gravier, lors de la conception, par la banque de données UNSODA. Pour le gravier, les essais expérimentaux (essai colonne et table de tension) ne fournissent que la queue de la courbe de la CRE. Pour de faibles valeurs de succion, la CRE devra être estimée avec la courbe UNSODA. De plus, lors de la réalisation des modélisations présentées dans ce mémoire, l'essai de table de tension sur le gravier n'était pas effectué. Ainsi, seulement les résultats de l'essai de colonne ont été retenus pour de hautes valeurs de succions.

La Figure 3-26 présente donc la CRE retenue pour le gravier (voir courbe CRE retenue), soit les résultats de l'essai de colonne pour de hautes succions combinées à la régression effectuée sur les données d'UNSODA pour les valeurs de faibles succions (à cause de l'absence de données expérimentales).

4.1.2 Fonctions de conductivité hydraulique (FCH)

Ayant évalué les paramètres du modèle de van Genuchten (1980), il est possible d'obtenir les FCH en utilisant l'équation Mualem-van Genuchten (1980) présentée au Tableau 2-3. La Figure 4-2 et la Figure 4-3 présentent les FCH pour les essais expérimentaux. Aux fins de comparaison, la FCH des données UNSODA, retenues lors de la conception, est aussi affichée. Pour cette FCH, des valeurs de perméabilité étaient fournies par la banque de données, indépendamment de la CRE. Ainsi, les paramètres de régression de van Genuchten (1980) ne sont pas les mêmes entre la CRE et la FCH du sable classe A. Les paramètres du modèle pour chacune des régressions sont présentés à la Figure 4-2 et à la Figure 4-3.

Pour obtenir les FCH, il faut fixer une valeur pour la conductivité hydraulique saturée, k_{sat}. Holtz et Kovacs (1991) présentent une relation empirique exprimant la conductivité hydraulique saturée en fonction du D_{10}, le diamètre correspondant au maillage du tamis à travers lequel 10% des particules passeraient, sur une base massique. Pour des sables propres, c'est-à-dire contenant moins de 5 % de particules passant le tamis 75 μm, et dont le D_{10} se situe entre 0,1 et 3 mm, le coefficient de perméabilité saturé est estimé par l'Équation 4-1.

$$k_{sat} = C \cdot D_{10}^2$$ **Équation 4-1**

Le terme k_{sat} est la conductivité hydraulique saturée, exprimée en m/s, C un paramètre variant entre 0,004 et 0,012, et D_{10}, le diamètre 10 % exprimé en millimètre. Cette équation est valable pour $k \geq 10^{-5}$ m/s. Pour le sable classe A, avec la valeur minimale du C, soit 0,004, et pour un D_{10} de 0,22 mm (Figure 3-23, granulométrie réalisée en 2005), on obtient une valeur de k_{sat} de $1{,}9 \times 10^{-4}$ m/s. Pour le gravier, avec la même valeur pour C et avec un D_{10} de 0,5 mm, déterminé à l'aide d'une granulométrie réalisée lors de la construction (annexe L), on obtient une valeur de k_{sat} de $1{,}0 \times 10^{-3}$ m/s. Comme toutes les analyses initiales ont été faites avec 1,5 $\times 10^{-4}$ m/s pour le sable et 1,5 $\times 10^{-3}$ m/s pour le gravier, ce sont ces valeurs qui ont été retenues. Une analyse réalisée *a posteriori* semble montrer que cela a un effet négligeable. En effet, l'ordre de grandeur de la LT théorique, selon le modèle de Ross (1990), ne change pas.

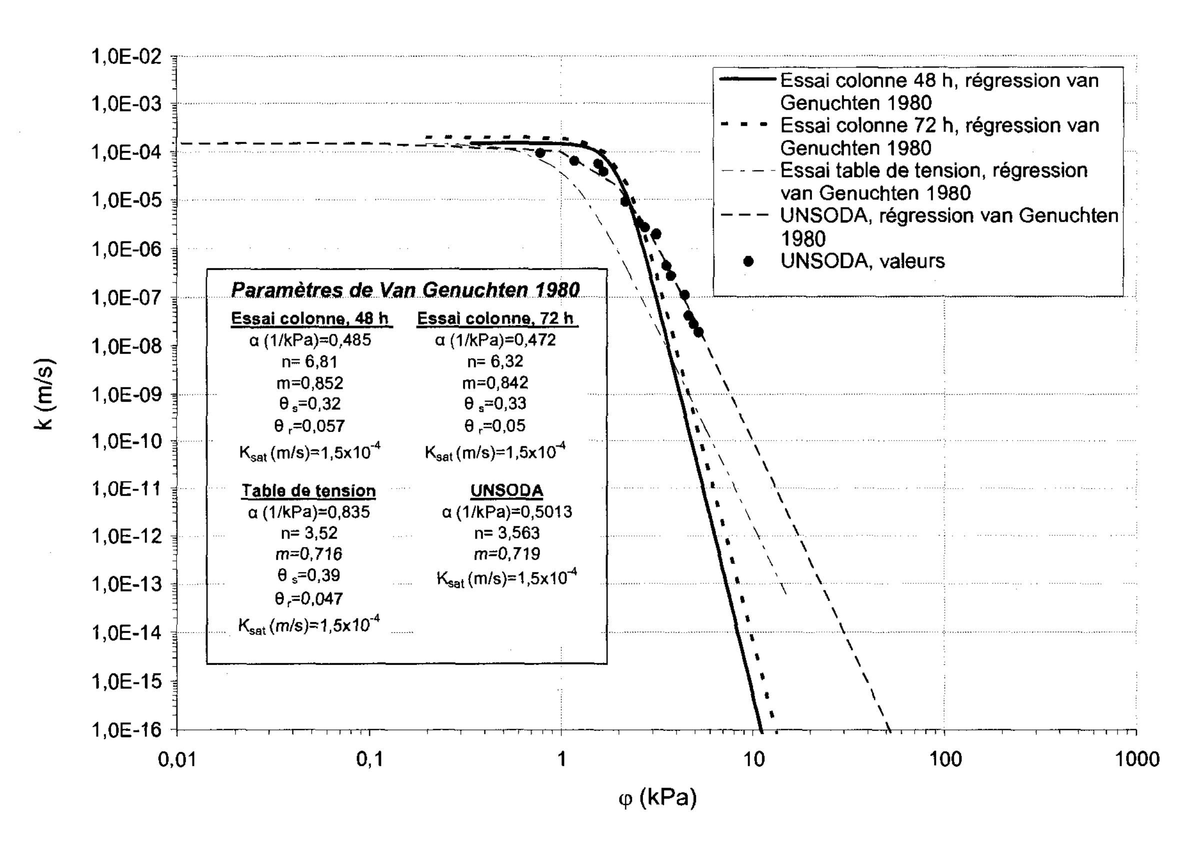


Figure 4-2 - FCH du sable classe A, pour différents essais expérimentaux ainsi que pour les données d'UNSODA

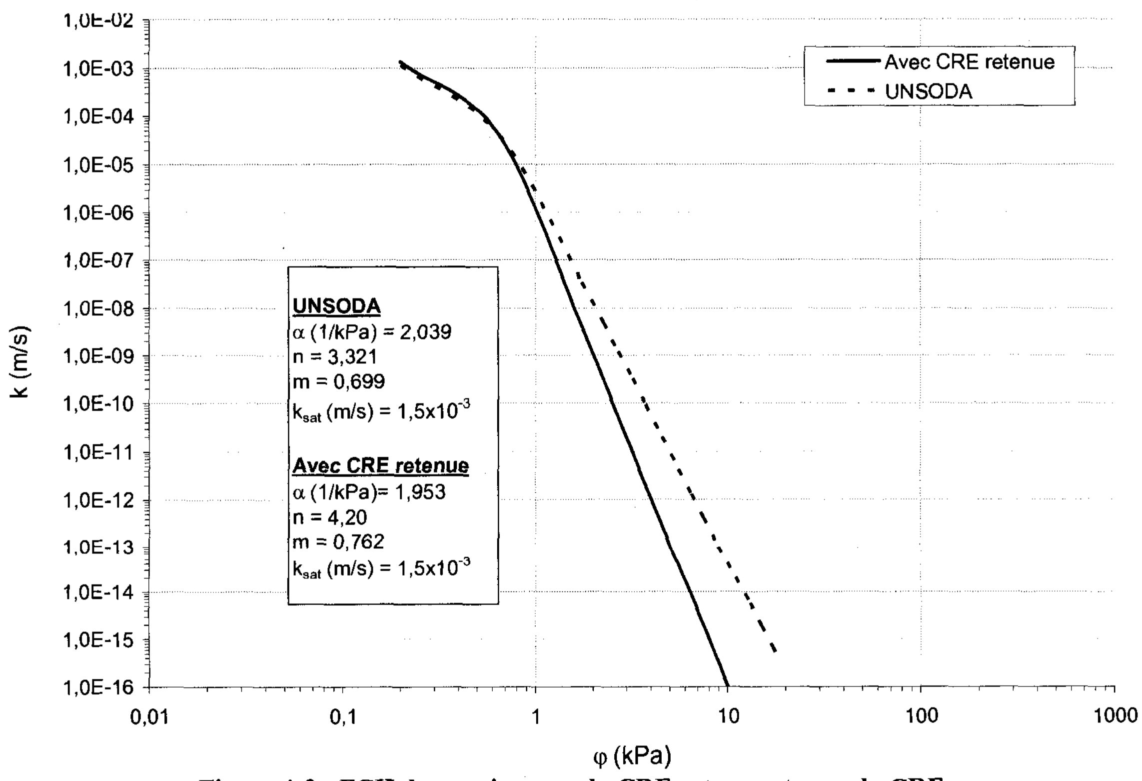


Figure 4-3 - FCH du gravier pour la CRE retenue et pour la CRE estimée lors de la conception (UNSODA)

4.1.3 Comportement théorique du recouvrement alternatif, selon la caractérisation des matériaux

À partir des propriétés des matériaux (CRE et FCH) obtenus expérimentalement, il est possible d'évaluer la LT théorique à partir de l'Équation 2-14 et de l'Équation 2-16. L'analyse a été réalisée avec le logiciel MatLab. Le code développé par Castelan (2007) est affiché à l'annexe M. L'analyse a été réalisée avec les propriétés estimées lors de la construction et avec les résultats expérimentaux. Les paramètres de van Genuchten (1980) retenus sont ceux de la Figure 4-2 et de la Figure 4-3.

Les résultats sont affichés à la Figure 4-4. Il est possible de remarquer que pour des débits de sollicitation variant entre 1 % et 100 % de valeur de k_{sat} du SPD, la LT demeure normalement faible (moins de 10 mètres) avec les matériaux évalués en laboratoire et estimés lors de la construction. Ces valeurs divergent de la LT visée par le design (30 mètres). C'est seulement pour le cas des propriétés du sable obtenues par la colonne de drainage, combiné au gravier évalué en laboratoire, que la LT est élevé (22 mètres pour le débit de conception de $5x10^{-9}$ m/s).

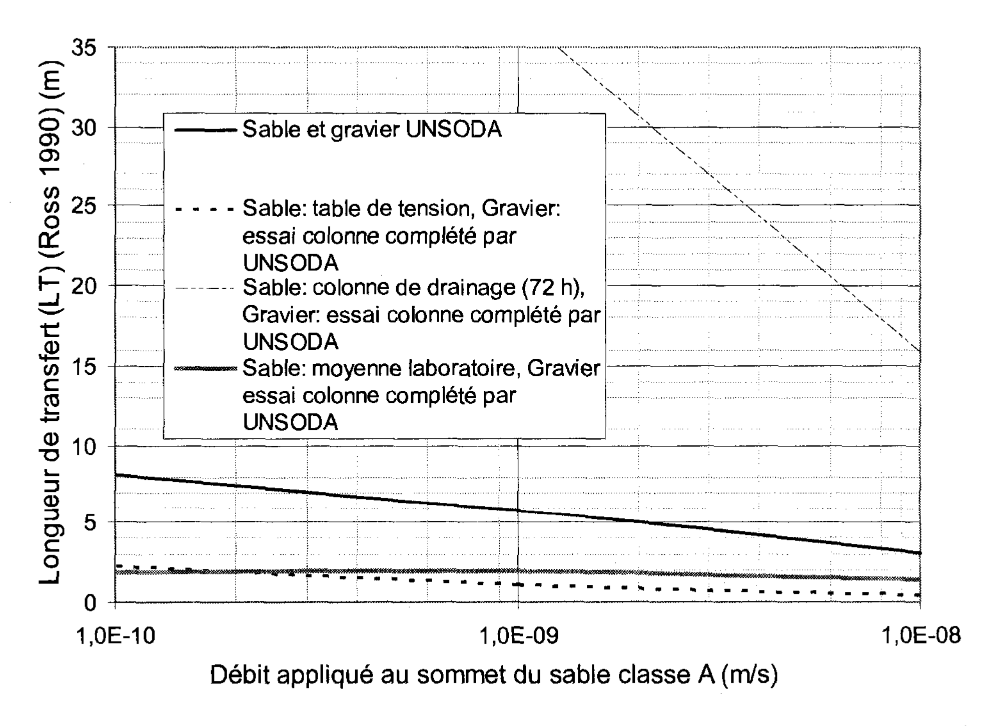


Figure 4-4 - Analyse des LT théoriques (Ross, 1990), en fonction du débit de sollicitation

4.2 Suivi du comportement du recouvrement alternatif

4.2.1 Données météorologiques

L'étude de la performance du recouvrement alternatif passe, entre autres, par l'étude des évènements météorologiques. Une partie des données de la station météo, présentées à la Figure 4-5, fournit un aperçu des conditions météorologiques sur deux années. Il y a eu une légère augmentation (8 %) de la quantité de précipitation de pluie en 2007 comparativement à 2006. Cependant, il y a eu davantage d'évènements extrêmes en 2006 (8 évènements supérieurs à 15 mm/h) qu'en 2007 (2 évènements supérieurs à 15 mm/h). Considérant ces faits, il est possible de s'attendre à ce qu'il y ait plus d'infiltration à travers le tout-venant en 2007 comparativement à 2006. Le tout-venant est le matériau placé au-dessus du SPD et exposé aux précipitations.

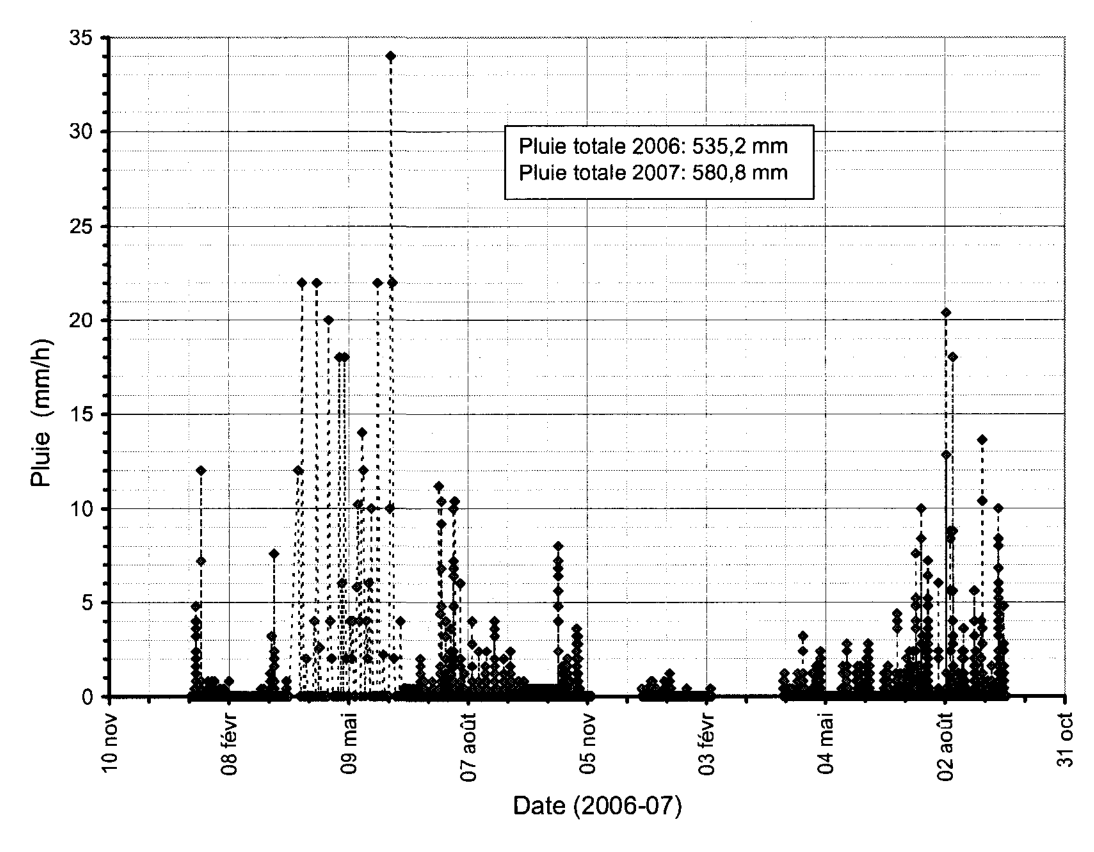


Figure 4-5 - Précipitations au site d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps, 2006 et 2007, données de la station météorologique installée près de la cellule

4.2.2 Suivi de la performance de la barrière hydraulique (SPD)

Il a été mentionné à la section 2.6.2 qu'une BC composée de matériaux grossiers, tels que du sable et du gravier, pouvait être efficace si une barrière hydraulique limite le taux d'infiltration vertical transféré à la CRC à une valeur maximale, équivalente à k_{sat} (on rejette l'hypothèse d'un gradient vertical supérieur à l'unité). La BC étudiée ici étant constituée de matériaux à haute conductivité hydraulique saturée (sable et gravier) susceptibles d'être soumis à de fortes infiltrations qui ne pourraient pas être transférées en bas de pente, l'ajout d'une couche de SPD au-dessus de la BC pourrait réduire le taux d'infiltration à, au plus, sa valeur de k_{sat} de $1x10^{-8}$ m/s. Par ailleurs, si la couche de SPD demeure saturée, elle sera moins perméable aux émissions de biogaz, ce qui aidera au captage de ces derniers. L'étude de cette augmentation de l'efficacité de captage des biogaz fait partie d'un projet plus vaste du groupe de géo-environnement de l'Université de Sherbrooke, comme mentionné à la section 1.2. La présente section ne donnera qu'un aperçu sommaire de ce sujet.

4.2.2.1 Teneur en eau du SPD

Plusieurs sondes de teneur en eau ECH_2O sont installées dans la couche de SPD. Leur emplacement est indiqué à la Figure 3-3. La Figure 4-6, la Figure 4-7 et la Figure 4-8 présentent la teneur en eau volumétrique du SPD, dans les profils A, B et C respectivement. Il y a absence de donnée durant l'hiver, puisque les acquisiteurs de données sont retirés.

En faisant abstraction des défectuosités temporaires[1], les valeurs de θ diminuent, en général, lorsqu'on se rapproche du sommet de la couche de SPD. Ceci est normal puisque dans un profil de sol, la succion augmente et ainsi la teneur en eau volumétrique diminue, avec la distance verticale par rapport à la nappe d'eau. Puisque la teneur en eau volumétrique de saturation du SPD, θ_{sat}, est estimée à 78 %, la base de la couche de SPD demeure

[1] PA-4 pour 2007, PB-1 en 2007, PB-2 au début des saisons, PC-1 à PC-4 en début de saison 2006 ainsi que PC-2 et PC-3 pour la saison 2007. Dans le but d'expliquer l'origine des défectuosités présentées ci haut, un échange a été réalisé avec les concepteurs de ces sondes de teneur en eau. Ils reconnaissent les défectuosités possibles du système et travaillent actuellement sur ces problèmes.

pratiquement saturée en 2006. En effet, en faisant abstraction des défectuosités ci-haut énumérées, la teneur en eau volumétrique moyenne à la base du SPD (PA-1, PB-1 et PC-1) est de 75,5 %, ce qui correspond à une succion de 14 kPa, soit bien en deçà de la φ_{VEA} (Figure 3-7). La couche de SPD est donc demeurée saturée en 2006 et remplit, probablement adéquatement, son rôle de couverture augmentant l'efficacité du captage des biogaz.

Il est aussi possible de constater que la teneur en eau volumétrique à la base du SPD diminue de l'amont vers l'aval (profil A au profil C) ainsi que dans le temps (2006 à 2007). Pour le profil C, en 2007, la teneur en eau à la base du SPD est, en moyenne, de 63,3 %, comparativement à 77,5 % pour le profil A, en 2006. Cette première teneur en eau correspond à une succion de 85 kPa, ce qui correspond pratiquement à la φ_{VEA} de la Figure 3-7. Il faut noter cependant que les propriétés hydrauliques d'un matériau hautement compressible comme le SPD varient dans le temps. En effet, le tassement des SPD entraîne une diminution de la porosité et donc variation de θ_{sat}. Ce sujet est décrit plus en détail à la section 4.2.3. À cette section, il est démontré que la θ_{sat} du SPD en 2007 serait autour de 66%, ce qui impliquerait que le SPD, pour cette dernière année, serait près de la saturation.

4.2.2.2 Succion dans la couche de SPD

Pour suivre l'évolution des succions dans la barrière hydraulique, deux types de tensiomètres sont installés dans la couche de SPD : un T4 et deux Irromètres mécaniques. Leur emplacement est indiqué à la Figure 3-3. L'Irromètre mécanique A s'est avéré défectueux. Cette défectuosité peut être expliquée par de multiples facteurs : problème de saturation, bris de la pierre poreuse, etc. La Figure 4-9 présente les valeurs de succion pour les tensiomètres retenus comme non défectueux et placés dans le SPD.

Les valeurs de succion du tensiomètre T4 TEN/SPD-1 sont légèrement supérieures à celles de l'Irromètre mécanique B. Ceci peut être expliqué par le fait que l'Irromètre mécanique B est installé plus bas dans la couche de SPD. Malgré ceci, les valeurs de succion mesurées sur le terrain sont bien en deçà de la VEA du SPD, évaluée par l'essai en laboratoire (90 kPa, Figure 3-7). Il est donc possible d'affirmer que le SPD reste saturé, ce qui est souhaité pour un meilleur captage des biogaz.

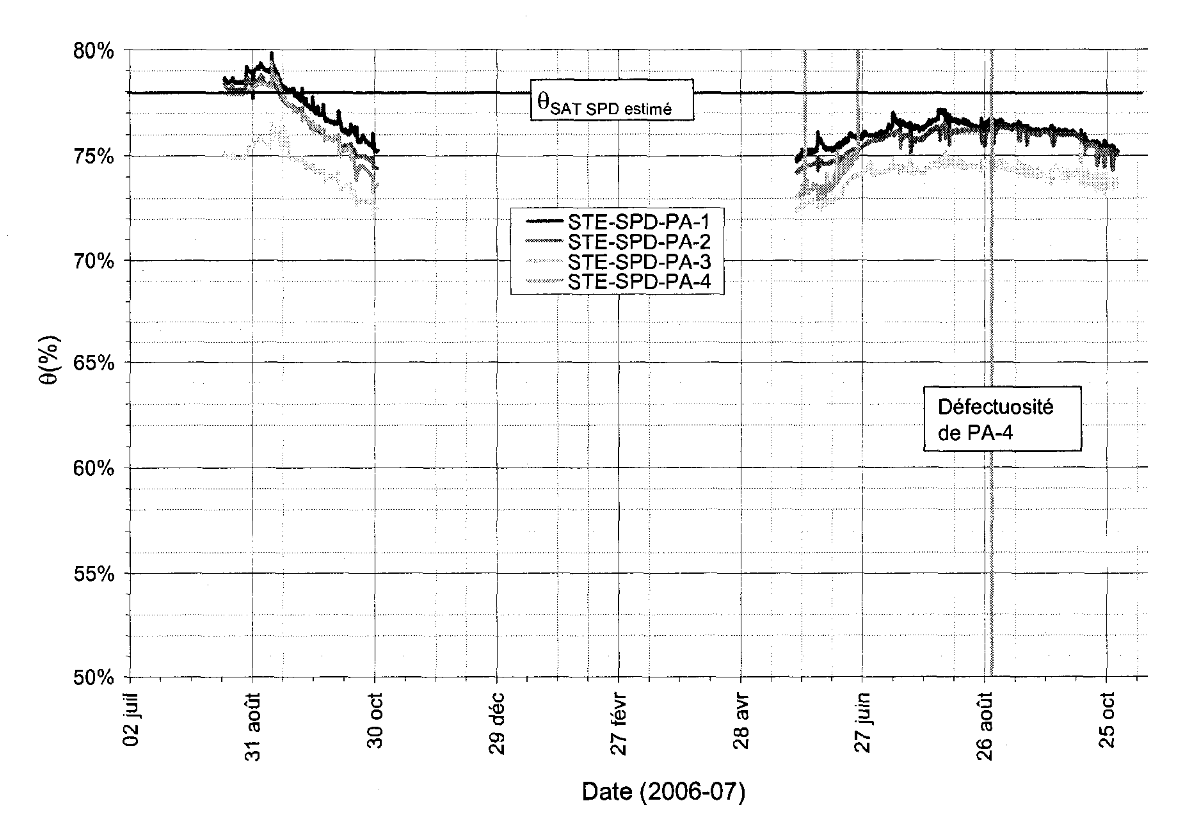


Figure 4-6 - Variation temporelle de la teneur en eau volumétrique du SPD, profil A

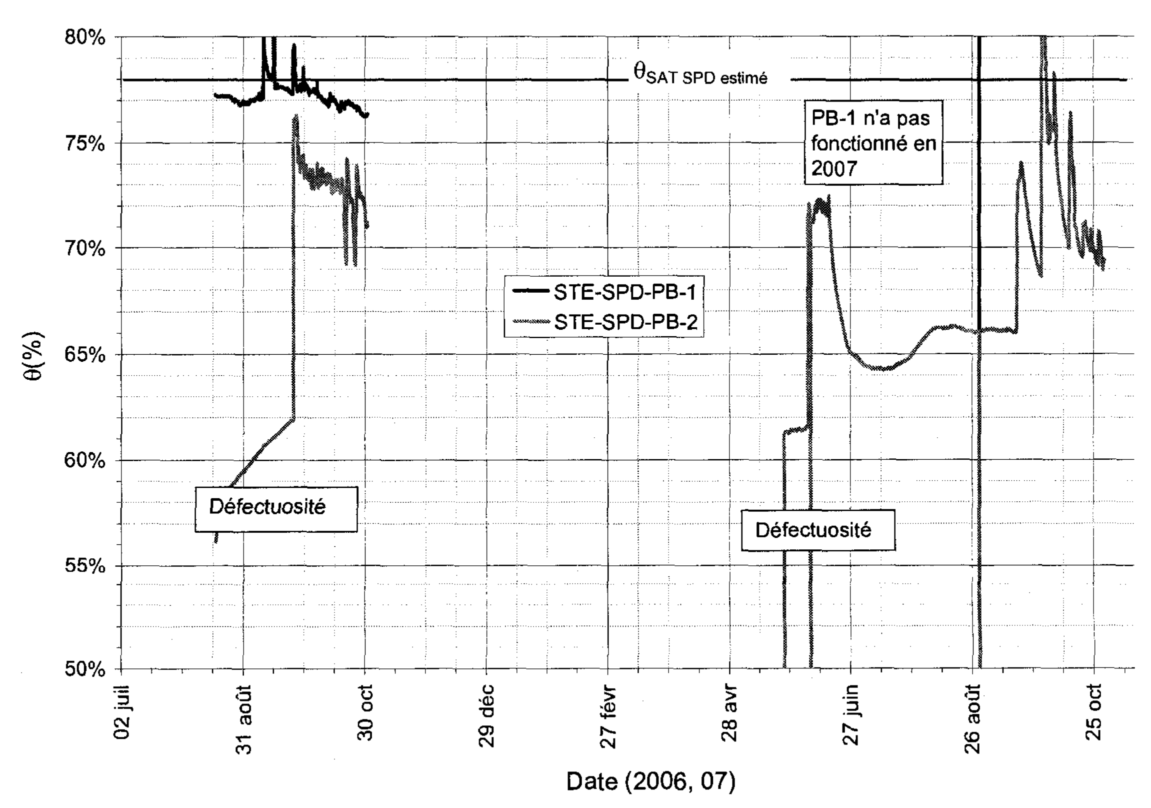


Figure 4-7 - Variation temporelle de la teneur en eau volumétrique du SPD, profil B

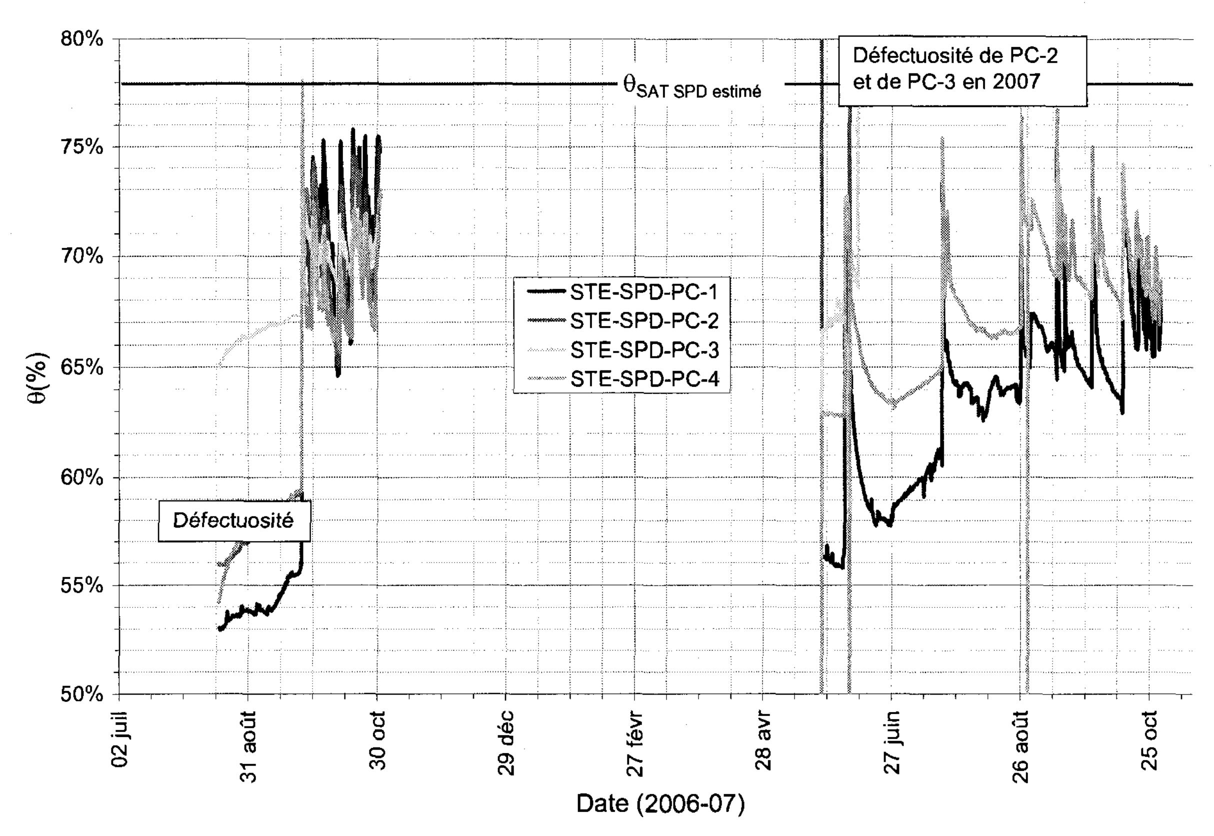


Figure 4-8 - Variation temporelle de la teneur en eau volumétrique du SPD, profil C

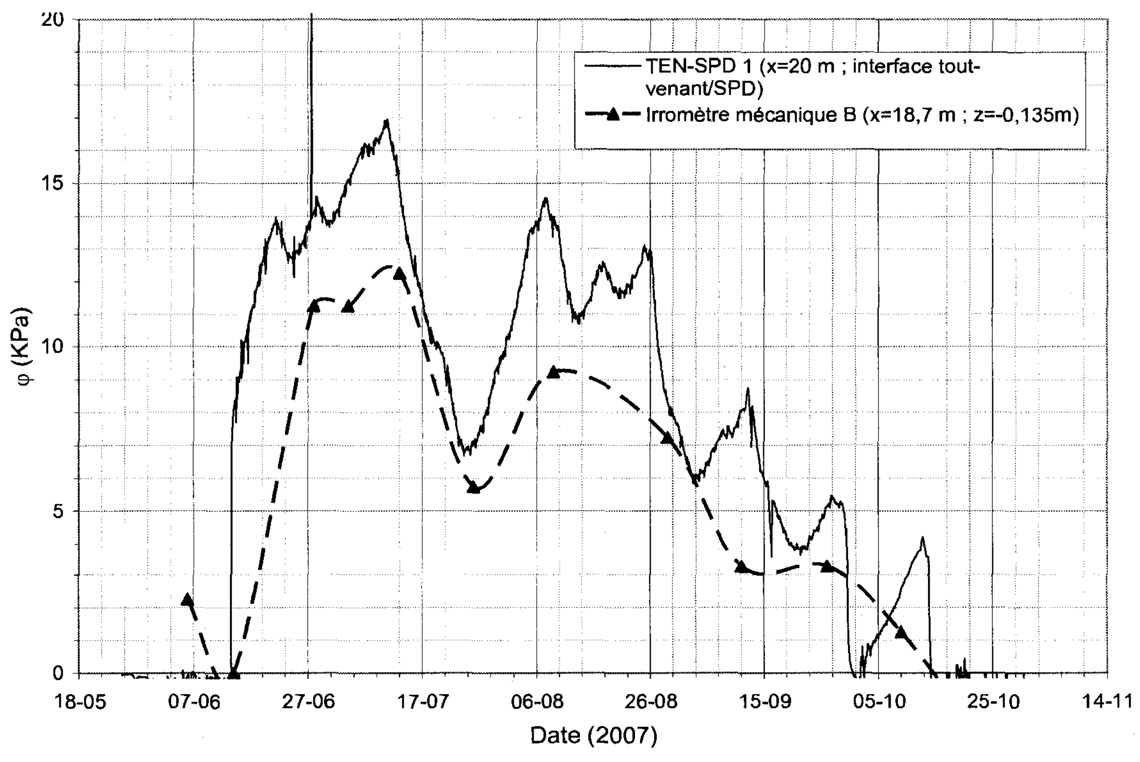


Figure 4-9 - Succion matricielle du SPD

4.2.3 Suivi de l'évolution des propriétés hydrauliques de la barrière hydraulique

4.2.3.1 CRE observé

Tel que discuté plus haut, les propriétés hydrauliques des matériaux hautement compressibles, comme le SPD, varient dans le temps. Des sondes de teneur en eau et des tensiomètres, installés à environ aux mêmes positions, peuvent donner une estimation de la CRE *in situ*. À cause des défectuosités temporaires et localisées de certaines sondes et du besoin d'obtenir une plage de valeurs de succion aussi large que possible, le seul couple de valeur adéquat s'est avéré être celui du tensiomètre S/SPD-1 et de la sonde ECH$_2$O PC-1. Ces deux sondes sont situées environ à la même position. La Figure 4-10 présente les résultats de cette étude. Une analyse avec le degré de saturation aurait été plus adéquate pour évaluer la φ_{VEA} d'un matériau hautement compressible (Parent et al., 2007), mais difficilement applicable ici, ne connaissant pas la véritable variation de l'indice des vides de ce matériau. Cependant, puisque les valeurs de succions mesurées sur le terrain ne permettent d'évaluer que la phase I de la CRE (Figure 2-2), sans la φ_{VEA}, l'analyse par θ n'aura pas de conséquences dans le présent travail.

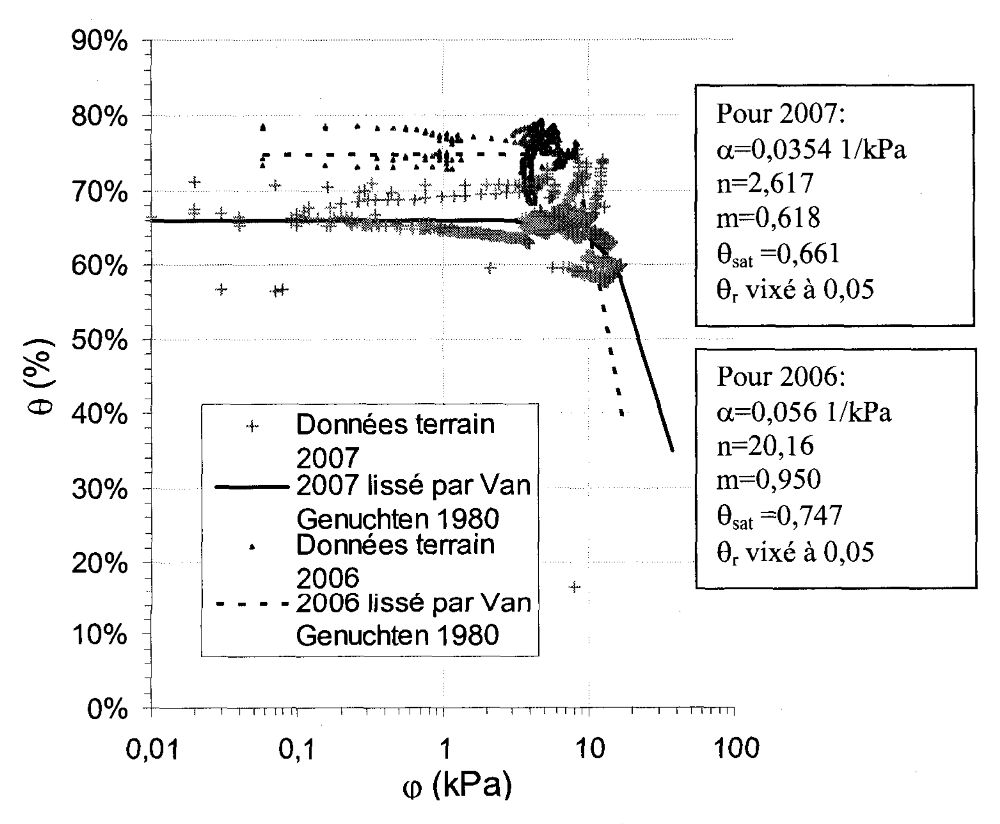


Figure 4-10 - CRE observé sur le terrain, 2006 et 2007

Il est difficile de tirer des conclusions claires et certaines de ces résultats, car les mesures réalisées sur le terrain s'avèrent être sous la forme de nuage de point. De plus, il n'y pas (ou très peu) de lecture de teneurs en eau pour des succions plus élevées que la φ_{VEA}. L'estimation des CRE pour des valeurs de succion plus élevées que cette φ_{VEA} est donc très arbitraire.

Néanmoins, il est possible de voir clairement une diminution de la valeur de la teneur en eau à saturation (θ_{sat}). La θ_{sat} en 2006 correspond à celle obtenue en laboratoire pour ce projet (Figure 3-7). De plus, la φ_{VEA} en 2007 (28 kPa = 1/0,0354) est plus élevée que celle de 2006 (17,9 kPa). Ces dernières observations correspondent aux conclusions de Parent (2006). Cet auteur mentionne que le tassement d'un matériau hautement compressible entraîne l'augmentation de la φ_{VEA}. Ces φ_{VEA} respectent la plage de valeurs pour la φ_{VEA} du SPD (15 à 60 kPa) présentée par Parent (2006), mais sont par contre inférieures à celle obtenue en laboratoire pour ce présent projet (Figure 3-7). Notons que le manque de données à haute succion sur le terrain influence grandement l'estimation du paramètre α (et donc de la φ_{VEA}).

4.2.3.2 Tassement de la barrière hydraulique 2006-2007

Trois plaques de tassement ont été installées à la cellule expérimentale pour étudier le comportement de la barrière hydraulique, comme le montre la Figure 3-3. Les résultats de ces instruments sont présentés à la Figure 4-11.

La plaque de tassement n°3 présente un tassement plus élevé que les deux autres plaques. Ceci peut être expliqué par une densité de mise en place plus faible du SPD (598 kg/m^3) comparativement aux SPD plus en amont (633 kg/m^3 pour les environs de la plaque de tassement n°2) (annexe A).

Une évaluation du k_{sat} du SPD dans le temps a été réalisée par l'étude de l'évolution de l'indice des vides, à l'aide des notions présentées par Terzaghi et al. (1967) et de certaines valeurs caractéristiques présentées par Bédard (2005) qui a étudié le fluage des SPD. Cette méthode, qui utilise une relation e-log(k_{sat}), décrite plus en détail par Abdolahzadeh et al. (2008). En utilisant la k_{sat} initialement fixée à 1×10^{-8} m/s, on obtient la variation de la perméabilité saturée présentée au Tableau 4-1.

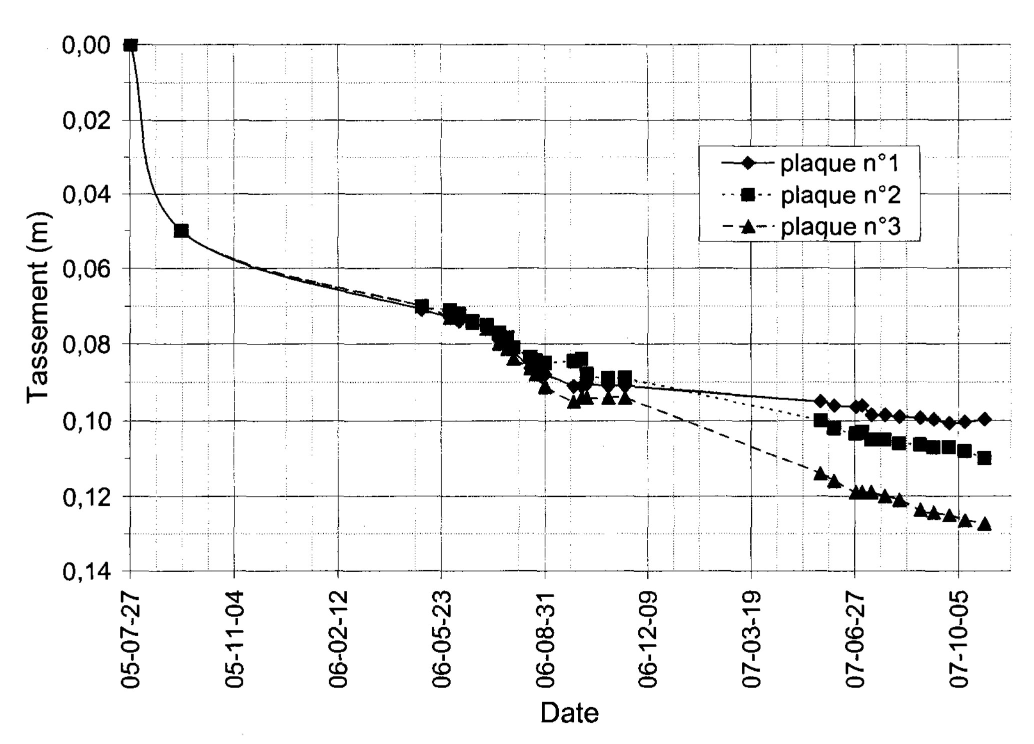


Figure 4-11 – Tassement mesurée par les plaques de tassement installées dans le SPD

Tableau 4-1 – Estimation de la variation de la conductivité hydraulique saturée du SPD dans le temps avec le tassement

Plaque de tassement	Date	k_{sat} (m/s)	Tassement total sur la période étudiée (m)
1	2005-07-28 2007-10-30	1,0E-08 1,6E-09	0,0997
2	2005-07-28 2007-10-30	1,0E-08 1,3E-09	0,1100
3	2005-07-28 2007-10-30	1,0E-08 1,1E-09	0,1273

4.2.3.3 Infiltromètre

Différents essais ont été réalisés avec un infiltromètre de type Mini-Disk en 2006 et en 2007. Le Tableau 4-2 présente ces résultats ainsi que les moyennes pour 2006 et 2007. Ces essais montrent que la k_{sat} du SPD diminue d'un facteur 9 entre l'année 2006 et l'année 2007. Un test sur la différence entre deux moyennes démontre qu'il y a seulement 9 % de chance que la k_{sat} de 2006 ne soit pas supérieur au k_{sat} de 2007.

Tableau 4-2 - Mesures de la conductivité hydraulique saturée du SPD avec l'infiltromètre Mini-Disk

Conductivités hydrauliques saturées (m/s)	
2006	2007
6,6E-09	2,3E-08
3,8E-08	7,7E-08
1,9E-08	3,4E-09
2,8E-08	1,9E-09
6,6E-07	2,3E-08
3,2E-07	7,4E-09
1,9E-08	---
moyenne	
1,6E-07	2,3E-08

Cependant, les moyennes des valeurs du k_{sat} mesurées sont supérieures à la valeur estimée lors de la conception ($1x10^{-8}$ m/s) et dépassent même la gamme de valeurs présentées à la section 3.1.5.1. Ce type d'essai, qui n'est pas normalisé ASTM, comporte son lot d'incertitudes reliées aux manipulateurs, variables selon les dates de prise de mesure. Le matériau testé est aussi non usuel. Le guide d'utilisateur ne fournit pas de conseil pour ce genre de matériau. De plus, l'analyse des résultats du Mini-Disk requière la connaissance des paramètres n et α du modèle de van Genuchten (1980). Ces derniers paramètres ont été fournis à partir de la CRE évaluée en laboratoire. Ces propriétés, en plus d'être variable dans le temps pour le SPD, ne sont pas nécessairement celles retrouvées sur le terrain

Néanmoins, cette analyse confirme, encore une fois, la tendance de la perméabilité saturée du SPD à diminuer dans le temps. Cette section complète la présentation de la variation des propriétés hydrauliques du SPD dans le temps commencée aux sections précédentes.

4.2.4 Suivi de la performance de la barrière capillaire

4.2.4.1 La succion à l'interface SPD-Sable

Pour suivre l'apport d'eau à la BC, des tensiomètres ont été installés à l'interface SPD/Sable. La variation temporelle de la succion à cette interface pour 2006 est présentée à la Figure 4-12. L'emplacement des tensiomètres à cette interface est indiqué à la Figure 3-3. On y observe une chute de succion entre le haut de la pente (TEN-S/SPD-1) et le bas de la pente (TEN-S/SPD-3) pouvant atteindre 3 kPa. Cette chute correspond à une augmentation de la

quantité d'eau transférée à travers l'interface (El Ghabi, 2007). Au fur et à mesure qu'on se dirige vers le bas de la pente, l'augmentation de la quantité d'eau transférée humidifie la couche de sable, faisant chuter la succion régnant dans ce matériau.

On remarque une concordance entre les variations temporelles de ces trois tensiomètres et le fait que les valeurs de la succion sont plus élevées uniquement pour le tensiomètre placé en haut de la pente (TEN-S/SPD-1). Cela signifie qu'en aval, la couche de SPD au niveau de l'interface avec le sable est très saturée. Plus en amont, l'effet de l'évaporation se fait sentir (Wilson et al., 1997). De plus, l'augmentation graduelle de la succion à partir du mois d'août peut être associée à une période de sécheresse. En effet, durant cette période, peu de précipitations ont été mesurées (Figure 4-5).

Les valeurs de succion obtenues avec le tensiomètre TEN-S/SPD-1, à partir de la date du 25 septembre 2006 sont affectées par un problème de désaturation. Cela semble être le cas aussi pour le tensiomètre TEN-S/SPD-3 (grande variation de succion à partir du 30 septembre 2006). Hormis les périodes de non-acquisition déjà connue (mai 2006 et mi-juillet 2006) pour les tensiomètres S/SPD-1 et S/SPD-2, on ne réussit pas à comprendre d'une manière certaine ce que représentent quelques-unes des valeurs nulles ou négatives de succion. Pour les tensiomètres T4, en 2006 (Figure 4-12), elles sont possiblement associées à des moments de mauvais fonctionnement de l'acquisiteur de données (début juin et octobre 2006). Si la succion avait réellement diminué jusqu'à atteindre des valeurs de près de zéro, on aurait dû observer de fortes infiltrations dans les lysimètres placés dans la couche de sable. Or, les données de ces lysimètres montrent que ça n'a pas été le cas, puisque le débit, pour cette période et pour la région du tensiomètre TEN-S/SPD-3, est de l'ordre de $1x10^{-11}$ m/s, comparativement à la valeur moyenne de $3,8x10^{-10}$ m/s (voir la section 4.2.4.3). Cependant, certaines perturbations peuvent être causées par des activités ponctuelles de restaurations des tensiomètres (fin juillet 2006). En effet, lors du processus de saturation, la jauge (Figure 3-15) est mise à condition de pression atmosphérique, ce qui cause la chute des valeurs de succions.

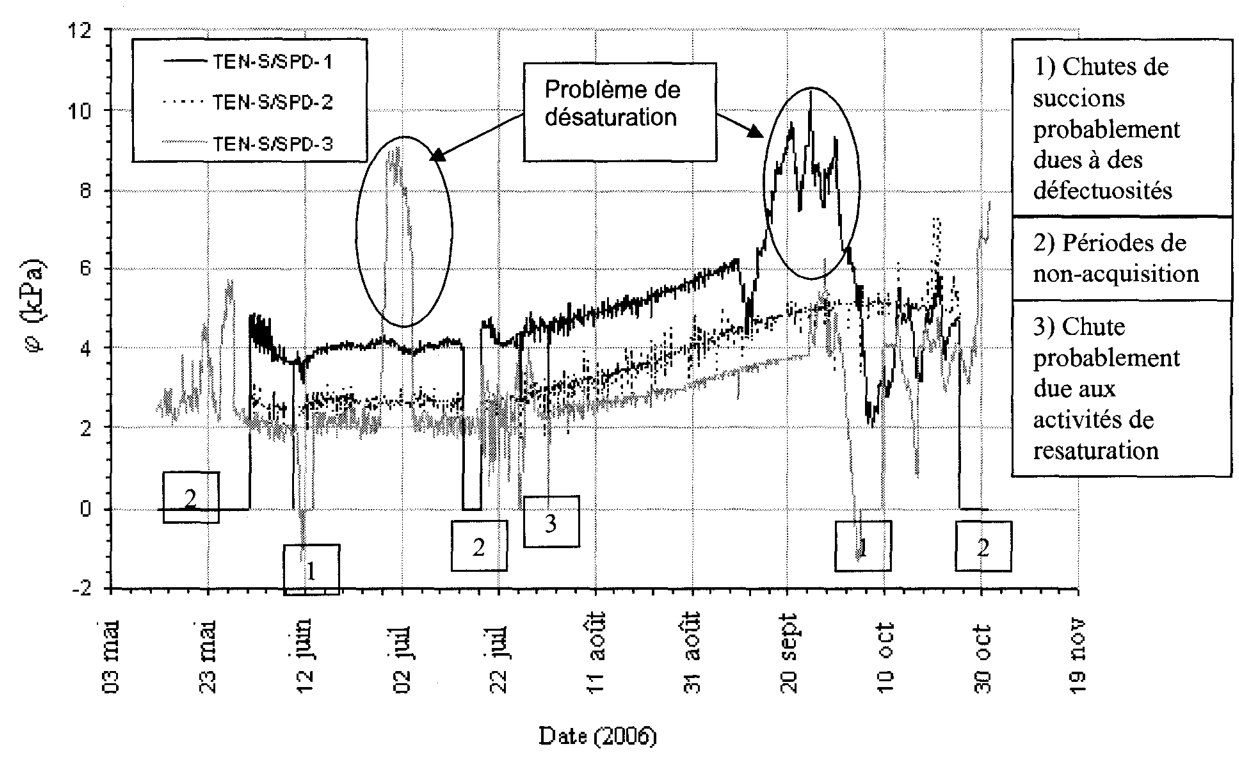


Figure 4-12 - Variation temporelle de la succion à l'interface SPD-BC, 2006 (El Ghabi, 2006)

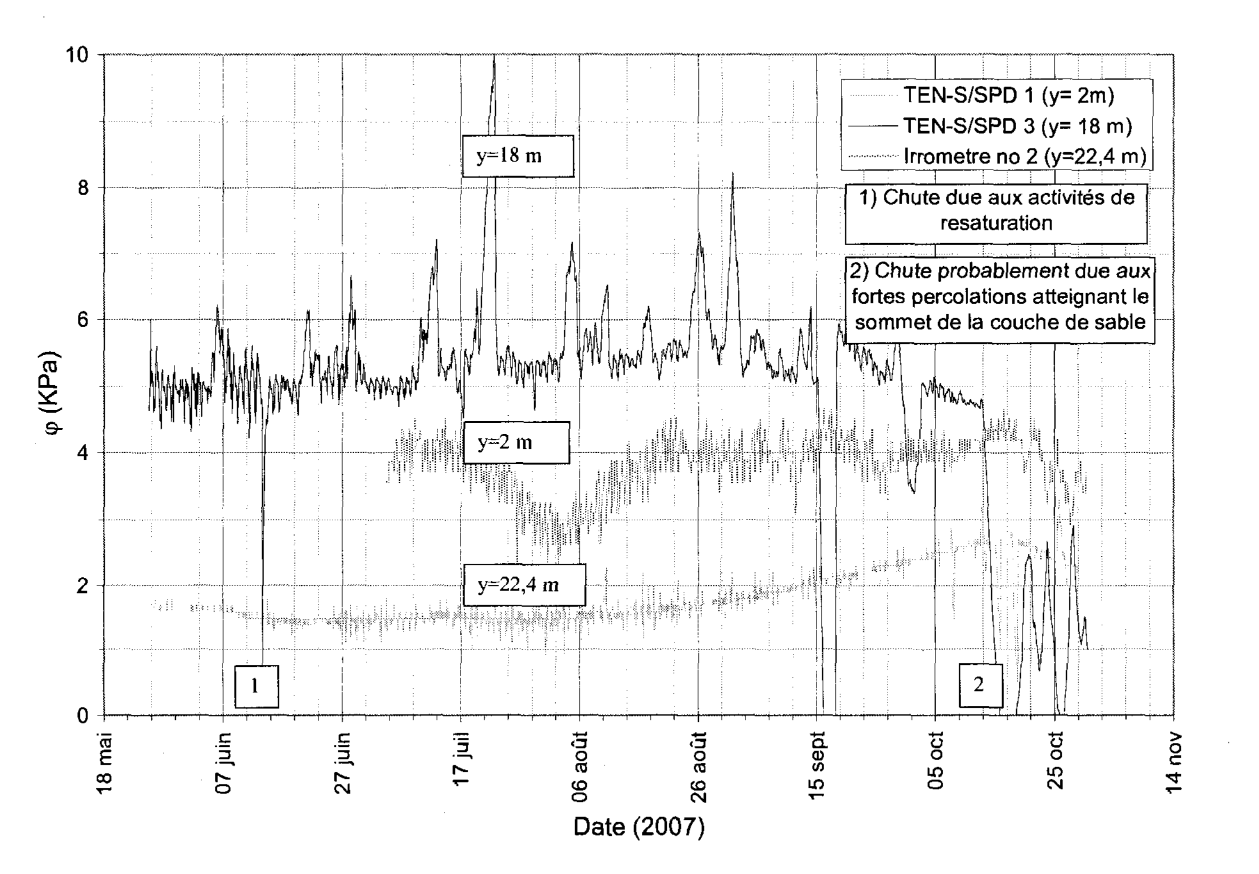


Figure 4-13 - Variation temporelle de la succion à l'interface SPD-BC, 2007

En 2007, deux Irromètres automatiques ont été rajoutés à l'interface SPD-Sable. L'Irromètre no 3 s'est avéré défectueux. Le tensiomètre S/SPD-2 est aussi devenu problématique. Les causes possibles de ces défectuosités sont nombreuses (bris de la pierre poreuse, joints non étanches, etc.). La Figure 4-13 confirme, en parti, les conclusions de 2006, soit que la quantité d'eau transférée à la couche de sable, par le SPD, augmente de l'amont vers l'aval. Cependant, les valeurs des tensiomètres S/SPD-1 et S/SPD-3 varient considérablement. La moyenne pour S/SPD-1 est de 6 kPa, avec un écart-type de 2 kPa. La moyenne pour le tensiomètre S/SPD-3 est de 4,9 kPa, avec un écart-type de 1,5 kPa. Ainsi, les valeurs des succions mesurées par ces deux tensiomètres ne sont pas significativement différentes en tout temps, car les deux écarts-types sont plus grands que la différence entre les deux moyennes. Cependant, il est possible d'affirmer que les valeurs de succion mesurées par l'Irromètre automatique no 2 (moyenne de 3,8 kPa, écart-type de 0,4 kPa) est plus faible que les succions mesurées par les T4 (S/SPD-1 et S/SPD-3).

Ceci voudrait dire qu'entre les positions de 18,0 et 22,4 mètres, il y a une augmentation de la quantité d'eau transférée à travers l'interface. Le fait que la succion ne soit pas très élevée à 2 mètres en 2007 comparée en 2006 peut être expliqué par certaines observations réalisées sur le terrain. Il a en effet été remarqué qu'il y avait accumulation d'eau sur le tout-venant au sommet du recouvrement alternatif en 2007. La compression du SPD à la frontière en amont a pu fournir une quantité d'eau dans les premiers mètres du recouvrement alternatif, faisant ainsi chuter la succion.

Des variations de succions en 2007 peuvent être, comme l'année précédente, expliquées par les activités ponctuelles de maintenance des tensiomètres (fin mai, début juin 2007). De plus, la chute de succion mesurée par les tensiomètres T4 à l'interface sable/SPD à partir de la mi-octobre 2007 (Figure 4-13) peut être expliquée par une augmentation des précipitations à la saison automnale, ce qui augmente la percolation et donc le débit atteignant le sommet de la couche de sable. Cette hypothèse peut être vérifiée par l'analyse des débits récoltés dans les lysimètres placés dans la couche de sable. Pour cette période, le lysimètre LYS-SAB-2, qui est placé à la même position que le TEN-S/SPD-3, recueille un débit pouvant atteindre $2x10^{-10}$ m/s, comparativement à la valeur annuelle moyenne de $1,6x10^{-9}$m/s, pour ce lysimètre (voir la

section 4.2.4.3). Ce grand débit de percolation à travers le sable permet de dire que ce dernier matériau est humidifié et que la succion qui y règne est faible. À ce moment, le sable serait près de la saturation et probablement qu'il y a percolation dans la couche de gravier. Enfin, on ne réussit pas à comprendre ce que représente la chute de succion du 15 septembre 2007 pour le tensiomètre TEN-S/SPD-3. Si la succion avait vraiment baissé à presque zéro, il y aurait eu infiltration. Or, les données des lysimètres montrent que ça n'a pas été le cas (débit du même ordre de grandeur que la moyenne annuelle pour 2007, soit de 10^{-11} m/s, voir la section 4.2.4.3). Il y a peut-être eu une défectuosité par rapport à l'acquisition des données.

4.2.4.2 Évolution temporelle de la succion dans le sable

Dans le but de suivre la performance de la BC, différents tensiomètres ont été installés à l'interface CBC/CRC. La Figure 4-12 et la Figure 4-13 présentent la succion à l'interface SPD/Sable. Puisque la succion est continue dans un profil de sol, la succion à l'interface SPD/Sable est similaire à la succion dans la partie supérieure de la couche du sable. La succion, au sommet de la couche de sable, varie généralement entre 2 et 6 kPa. Sachant que la VEA du sable varie entre 0,94 kPa (CRE obtenue à partir des propriétés UNSODA) et 2,1 kPa (selon l'essai de table de succion), il est donc possible de conclure que la partie supérieure de la couche de sable demeure, généralement, à un niveau de succion plus élevé que la VEA et est donc non saturée. Le sommet de la couche de sable demeure donc, la plupart du temps, sec en 2006 et en 2007.

Une discussion sur les variations anormales des succions et les défectuosités ponctuelles ou non de ces tensiomètres a déjà été réalisée à la section 4.2.4.1.

Pour la partie inférieure de la couche de sable, quatre tensiomètres T4 sont placés à l'interface sable-gravier, comme le montre la Figure 3-3. Les mesures de ces tensiomètres sont présentées à la Figure 4-14 pour deux années (le manque de données est associé à la période hivernale). En 2006, la succion diminue de l'amont vers l'aval – voir la Figure 4-14. En effet, à une distance horizontale de 6 mètres du haut de la cellule (TEN-S/G-1), on mesure des succions variant entre 4,0 et 7,5 kPa environ, comparativement à 1,2 kPa et 2,4 kPa à 29 mètres (TEN-S/G-4). Puisque la φ_{VEA} est estimée à une valeur qui varie entre 0,94 et 2,1 kPa

(selon les propriétés du sable retenues), il est possible d'affirmer que ce matériau est presque saturé en bas de pente et qu'il peut y avoir transfert d'eau vers le gravier. La chute de succion est plus faible entre les positions de 23 et 29 mètres (TEN S/G-3 et TEN S/G-4). À cette position, le débit drainé par le sable est donc presque atteint. Les mesures de succions par les différents tensiomètres peuvent être étudiées par une analyse spatiale (Figure 4-15). En 2006, la LT serait de l'ordre de 23 mètres, soit la position où la succion semble se stabiliser.

De plus, l'augmentation graduelle de la succion à partir du mois d'août en 2006 peut être associée à une période de sécheresse. En effet, durant cette période, peu de précipitations ont été mesurées (Figure 4-5).

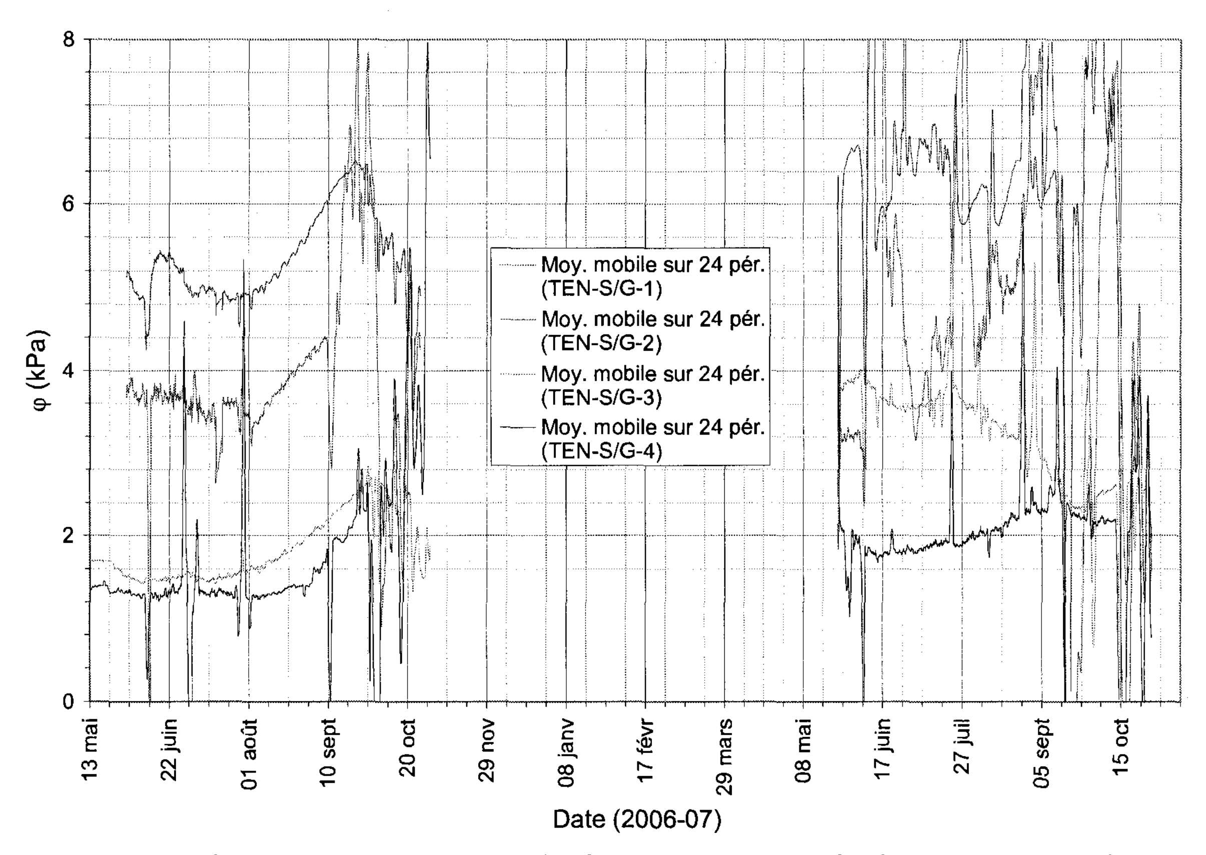


Figure 4-14 - Mesures des tensiomètres T4 sur deux années, interface sable-gravier

Pour 2007, les succions mesurées par les différents T4 sont plus variables (Figure 4-14). Cependant, la tendance est encore à la diminution de la succion de l'amont vers l'aval. En effet, les succions moyennes pour les tensiomètres S/G 1 à 4 sont, respectivement, de : 6,0 kPa, 5,0 kPa, 3,2 kPa et 2,0 kPa. Le sable, comme en 2006, semble s'humidifier de plus en plus en se dirigeant vers le bas de la pente. La stabilisation de la chute de cette succion est différente en 2007 qu'en 2006. En effet, la succion du tensiomètre S/G-3 est, tout au long de l'été 2007, significativement supérieure à celle mesurée par le tensiomètre S/G-4. C'est seulement vers la mi-septembre que ces deux valeurs se rejoignent. En 2007, la LT a été supérieure à 23 mètres tout au long de l'été, ce n'est qu'en septembre qu'elle a régressé à 23 mètres, ce qui s'explique probablement à l'augmentation des précipitations causées par les pluies automnales (Figure 4-14).

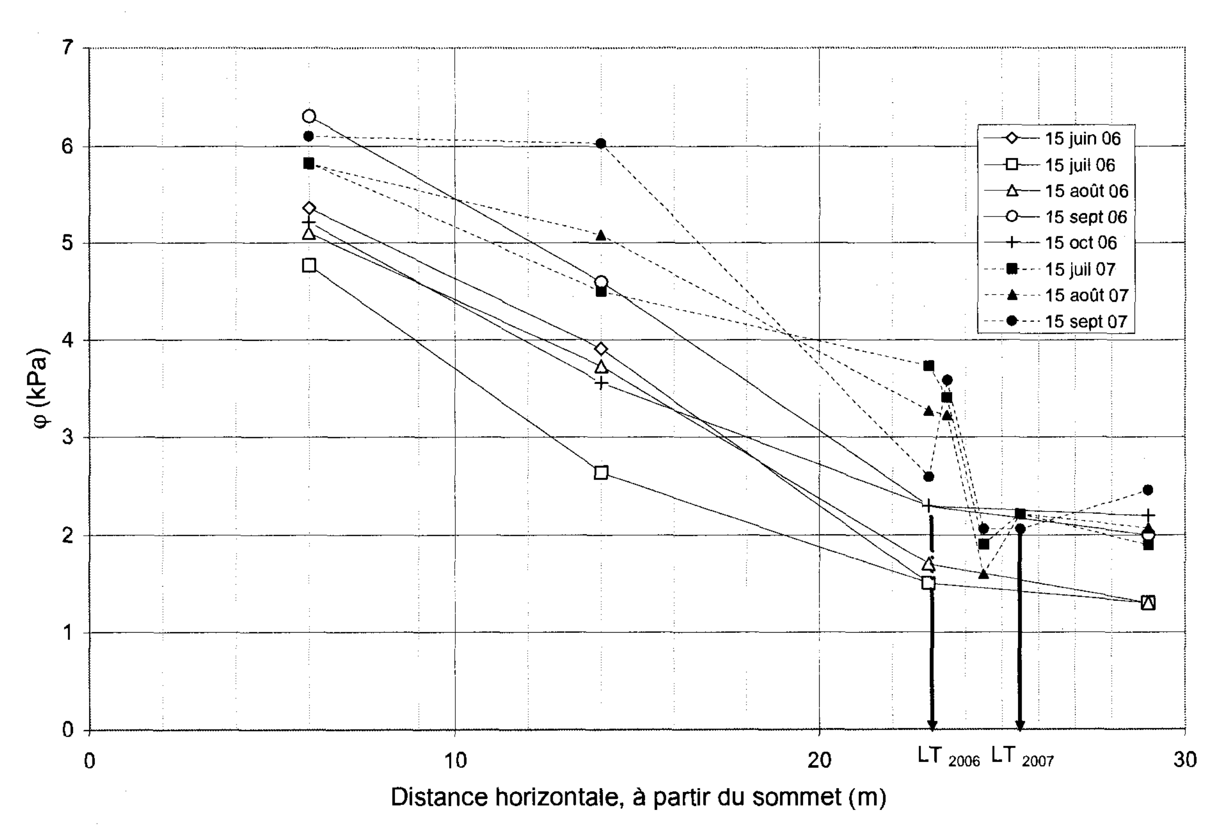


Figure 4-15 - Analyse spatiale de la succion à l'interface CRC-CBC

Ces conclusions peuvent être vérifiées par l'analyse des résultats obtenus des Irromètres installés à la même interface (sable/gravier) près de la position où on estime le point de

transfert – voir la Figure 4-16. Pour l'été 2007, la chute de succion observée par les tensiomètres T4 est encore mesurée par les Irromètres, entre 23,5 mètres et 24,5 mètres, mais ça ne semble plus être le cas plus en aval. Pour l'automne 2007, les valeurs de l'Irromètre n° 6 ont même rejoint celles de l'Irromètre n° 4, comme c'est le cas pour les tensiomètres S/G-3 et S/G-4 (Figure 4-14). Selon ces valeurs, la LT en 2007 serait de 24,5 mètres en été et inférieure en automne.

Pour représenter graphiquement cette chute, une analyse spatiale des succions pour 2007, est présentée à la Figure 4-15. Cette étude permet aussi de conclure que la LT en 2007 serait plus élevée que celle de 2006, soit d'environ 25,5 mètres pour les trois périodes étudiées, soit l'endroit où la succion se stabilise. Cette régression de la LT durant la saison 2007 s'explique probablement par l'augmentation des infiltrations causées par les pluies automnales.

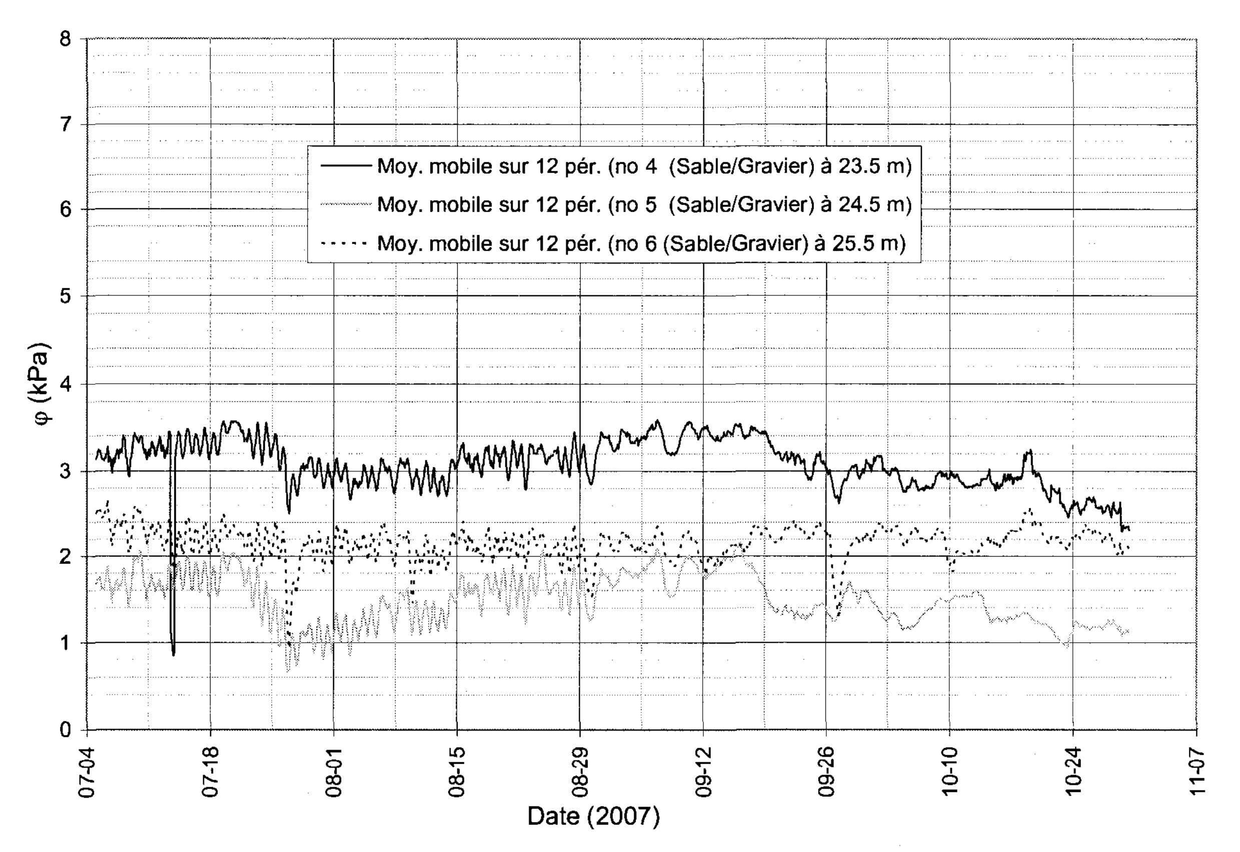


Figure 4-16 - Mesures des Irromètres en 2007, interface sable-gravier

4.2.4.3 Suivi de la performance de la barrière capillaire en termes d'infiltration

- Fiabilité des lysimètres

Pour la détermination de l'infiltration des précipitations atmosphériques percolant la barrière capillaire, six lysimètres ont été utilisés, dont trois dans la couche de sable et trois dans la couche de gravier. Le dimensionnement de ces lysimètres a été réalisé par l'équipe de géoenvironnement de l'Université de Sherbrooke en se basant sur les FCH des sols et sur la base d'un débit de percolation obtenu par le logiciel Visual HELP. Le dimensionnement a été conçu de telle façon que le lysimètre n'influence pas l'écoulement. La description de la procédure du dimensionnement est réalisée par Parent et Cabral (2006b). Des lysimètres de 0,6 mètre de haut étaient requis pour que ceux-ci mesurent adéquatement les débits s'infiltrant dans la couche de sable. Puisque cette dernière n'a que 0,4 mètre d'épaisseur, le design présenté à la Figure 3-3 a été retenu. D'après des simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel SEEP/W lors de la conception, les lysimètres seraient en mesure de récolter 85 % des infiltrations. Avant toute interprétation des résultats, il est donc primordial de vérifier la fiabilité du lysimètre comme moyen juste de suivi du recouvrement alternatif étudié.

Pour ce faire, deux tensiomètres (TEN-LYS-2B et TEN-LYS-2H) ont été placés à l'intérieur du lysimètre LYS-SAB-2 pour une évaluation temporelle de la succion à sa base et à son sommet. Le tensiomètre TEN-S/SPD-3 est situé à proximité du lysimètre à la même élévation que TEN-LYS-2H. Leur emplacement est indiqué à la Figure 3-3. Les variations temporelles des succions mesurées par ces trois tensiomètres sont présentées à la Figure 4-17. L'absence de donnée correspond à la période de non-acquisition durant l'hiver.

En 2006, en haut du lysimètre, on trouve une succion semblable, à son centre et à l'extérieur, ce qui indique l'absence d'un gradient hydraulique horizontal, et donc que le lysimètre ne dévie pas l'eau de percolation. En effet, s'il y avait un tel gradient, l'eau éviterait le lysimètre et ce dernier ne fonctionnerait pas adéquatement (Bews et al., 1997, Parent et Cabral, 2006b).

Cependant, les résultats du tensiomètre à la base du lysimètre ne donnent pas de succions nulles, telles qu'on l'espérait. En effet, la majorité du temps, l'acquisiteur DL6 fournit la

lecture «#-INF», indiquant que le voltage lu est inférieur à la plage admissible pour l'acquisiteur, plage commençant à -10 mV (équivalent à une succion de -1 kPa). Ainsi, pour 2006, il est possible de conclure qu'il y a, à la base du lysimètre, pour la majorité du temps, une pression d'au moins 1 kPa, indiquant une accumulation d'eau dans le lysimètre, c'est-à-dire qu'il y a un mauvais drainage.

En conclusion, puisqu'il y a absence de gradient hydraulique horizontal au sommet du lysimètre en 2006, les volumes d'eau globaux récoltés sont représentatifs du volume d'eau percolant dans la couche de sable. Il est à noter, cependant, que l'eau n'est pas drainée au fur et à mesure de son arrivée à la base du lysimètre; il se peut donc que, pour des prises de mesures rapprochées, les mesures de débits récoltés ne coïncident pas avec les volumes d'eau percolé.

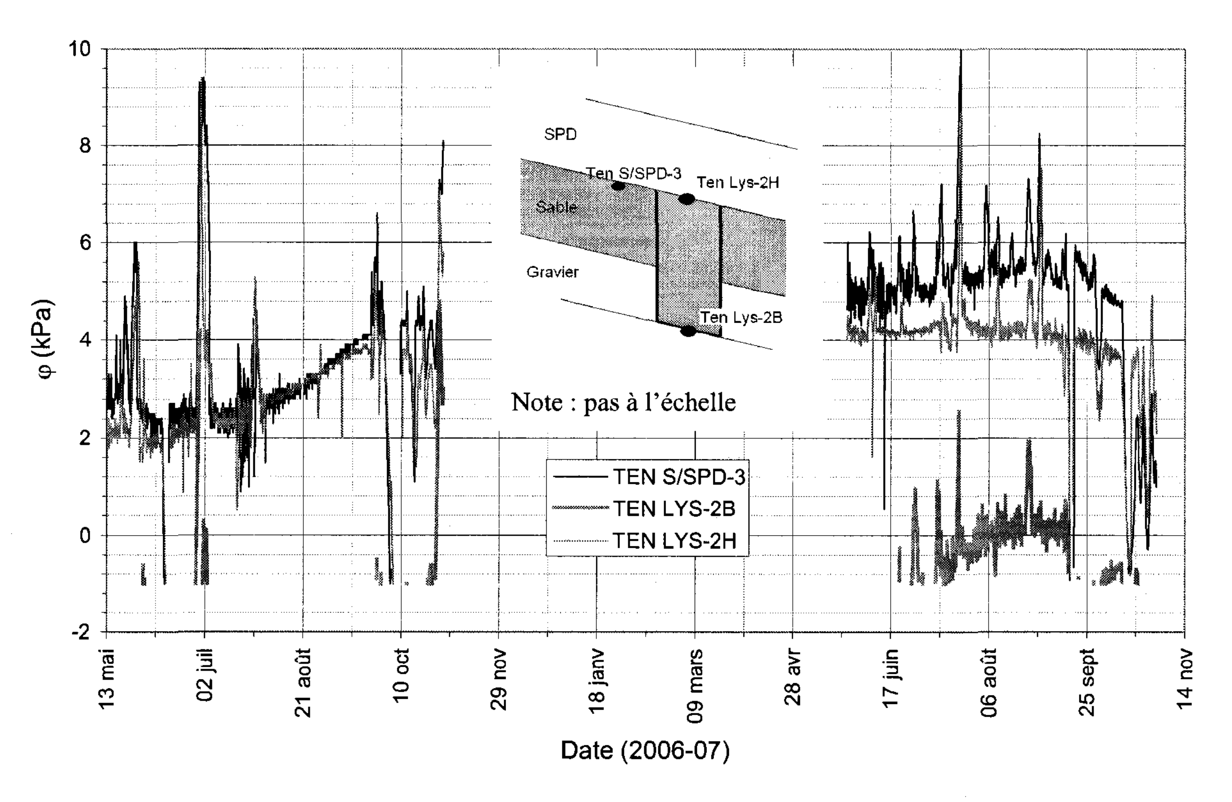


Figure 4-17 - Succions mesurées en bas et en haut (à l'intérieur et à l'extérieur) du lysimètre sable 2

Pour 2007, les succions mesurées à la base du lysimètres sont variables. En effet, elles oscillent autour de 0 kPa, avec une moyenne de -0,1 kPa environ. Puisque la succion est pratiquement nulle (faible pression) et que lorsqu'il y a une pression de générée, elle revient rapidement à zéro, il est possible de conclure que le lysimètre draine adéquatement l'eau accumulée en son fond.

Cependant, les deux tensiomètres placés au sommet du LYS-SAB-2 en 2007 mesurent des succions différentes. En effet, le tensiomètre à l'extérieure du lysimètre mesure une succion en moyenne de 0,9 kPa plus élevée que celle mesurée à l'intérieur du lysimètre. De ce fait, la percolation de l'eau éviterait le lysimètre. Cette différence de succion peut être entraînée par un débit de sollicitation atteignant la BC plus faible que celui prévu lors du *design*. De plus, environ 10 % de cette différence (0,1 kPa sur 0,9 kPa) peut la plupart du temps être associée à la pression existante à la base du lysimètre.

Une simulation numérique avec SEEP/W a été réalisée pour quantifier ce détournement et ainsi déterminer la sous-estimation des mesures du lysimètre. Un lysimètre de 60 cm de haut et de 1 mètre de large, tel que retrouvé sur le terrain, a été placé au centre d'une couche de sable avec les propriétés du sable classe A ici étudié (UNSODA). Un différentiel d'énergie totale de 0,09 mètre (0,9 kPa) a été appliqué entre l'intérieur et l'extérieur du lysimètre, à environ 1 mètre de distance, conformément avec les mesures du terrain (Figure 4-18). Une nappe d'eau a été mise à la base de la couche et une condition de drainage a été appliquée à la base du modèle. Le débit de sollicitation est celui retenu pour le *design* (le débit 85 %, $5x10^{-9}$ m/s, section 3.1.5.2). Puisque le sommet des lysimètres installé dans le sable atteint la couche de SPD, le lysimètre modélisé atteint pratiquement, lui aussi, le sommet de la couche. Les épaisseurs des parois du lysimètre sont de 3 centimètres. Les résultats sont présentés à la Figure 4-18.

Le différentiel de succion mesuré sur le terrain entraîne une déviation de la percolation de l'eau, comme il était prévu. En effet, pour 1 mètre de large, le lysimètre mesure $2,8x10^{-9}$ m/s au lieu de $5x10^{-9}$ m/s. Il est donc possible de conclure que la différence de succion mesurée

sur le terrain entraînerait une sous-estimation des valeurs du lysimètre d'environ 45 % du débit de percolation, si ce débit est celui retenu pour le *design*.

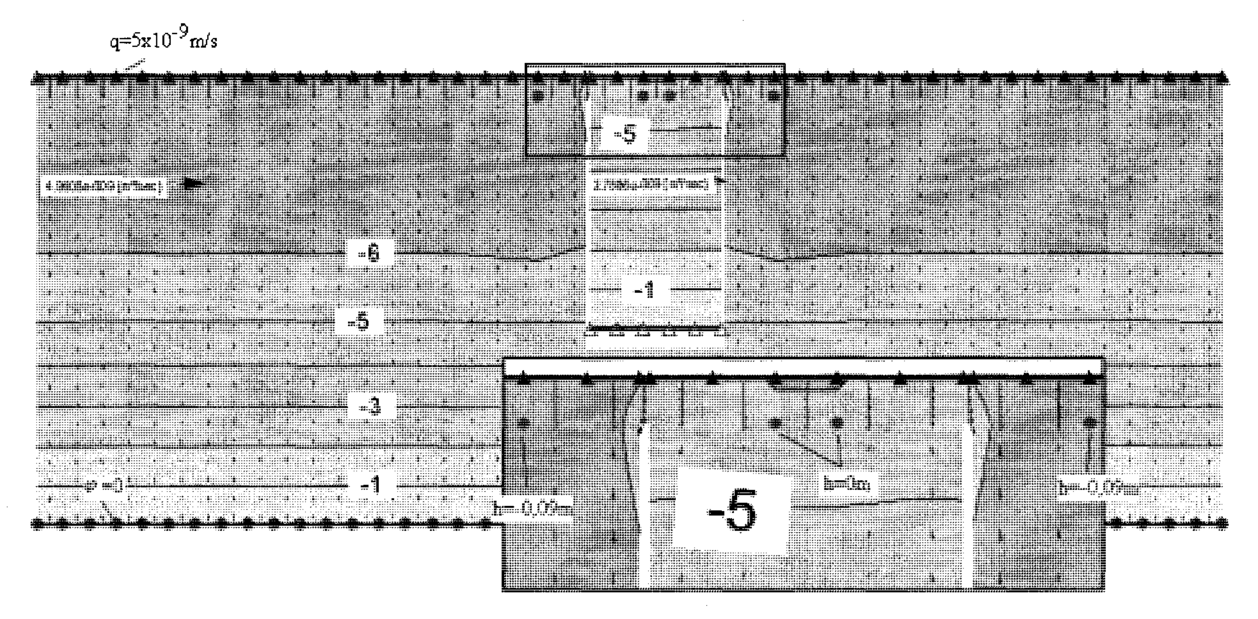


Figure 4-18 - Simulation de l'efficacité d'un lysimètre dans le sable, en considérant les succions sur le terrain

Malgré ces lacunes, les lysimètres installés dans le sable donneraient un bon aperçu de la percolation *in situ* à l'interface SDP/sable classe A. On est aussi en droit de penser que la situation serait relativement similaire pour les lysimètres installés dans le gravier. La hauteur nécessaire pour ces lysimètres était de 14 cm, la valeur de 20 cm a été retenue pour la construction, diminuant ainsi les chances de défaillances de ces lysimètres.

Cependant, il a été démontré plus haut que la conductivité hydraulique du SPD diminue dans le temps. Ceci diminuera aussi le débit atteignant la CRC. Ce débit ne sera plus celui fixé au *design*, ce qui causera, possiblement, une défaillance des lysimètres. Ceci sera discuté au chapitre 5.

Bref, en 2006 et en 2007, les lysimètres installés dans le sable et le gravier donnent l'ordre de grandeur des percolations au travers la CRC et la CBC.

➢ Détermination de la LT observée par les lysimètres

Les résultats des lysimètres, jugés viables pour leur ordre de grandeur, sont présentés au Tableau 4-3. De plus, la Figure 4-19 présente la moyenne de ces débits mesurés, ainsi que les écarts-types des lectures pour chacun de ces lysimètres placés dans le gravier, en 2006 et en 2007.

On observe que les lysimètres installés dans la couche de sable ne collectent aucune eau, entre autres, le 9 juin 2006 (période sèche). En période de précipitations abondantes (6 octobre 2006, 9 octobre 2007 [pluies automnales]), les trois lysimètres collectent des débits équivalents. Pour des précipitations intermédiaires, comme c'est le cas la majorité du temps, le débit collecté tend à augmenter en fonction de la distance du sommet de la pente (Lacroix Vachon et al., 2007).

Bien que ce ne soit pas le cas en tout temps (particulièrement lors des périodes extrêmes), le débit arrivant au sommet de la BC sera fixé comme une constante pour la modélisation présentée à la section 4.3. Pour 2006, le débit moyen atteignant le sable est de l'ordre de $1x10^{-9}$ m/s et, en 2007, de $1{,}1x10^{-10}$ m/s, ou $2{,}0x10^{-10}$ m/s si on applique une correction pour tenir compte de la différentielle de succion au sommet du lysimètre. Bref, la quantité d'eau atteignant le sable diminue considérablement en 2007, comparativement à 2006, appuyant ainsi les conclusions de la diminution de la conductivité hydraulique saturée du SPD dans le temps.

La LT peut être estimée de façons approximatives à partir des mesures des quantités d'eaux récoltées dans les lysimètres du gravier. Durant l'été 2006 et 2007, une quantité d'eau significative a été récoltée dans la couche de sable surtout lors de précipitations importantes. En 2006 par contre, pratiquement aucune quantité d'eau n'a été récoltée dans les lysimètres LYS-GRA-1 et LYS-GRA-2. C'est à partir du LYS-GRA 3 que des quantités importantes d'eau ont été prélevées. Cela indique que la LT est atteinte entre les lysimètres LYS-GRA 2 et LYS-GRA 3; en d'autres termes, entre les chaînages 24 mètres et 29 mètres (Figure 4-19).

Tableau 4-3 - Débits récoltés aux lysimètres installés dans la CRC et la CBC, 2006 et 2007

Date	Débit mesuré (m/s)*					
	LYS-SAB-1	LYS-SAB-2	LYS-SAB-3	LYS-GRA-1	LYS-GRA-2	LYS-GRA-3
06-05-31	4,4E-11	4,8E-10	2,5E-10	7,1E-11	3,5E-11	6,5E-10
06-06-09	0	0	0	0	0	0
06-06-22	7,9E-10	1,7E-10	2,1E-10	2,3E-11	1,1E-11	1,9E-10
06-07-26	8,0E-11	2,7E-11	1,7E-10	2,1E-11	1,1E-10	1,7E-11
06-08-01	6,1E-11	1,2E-11	2,8E-10	2,5E-12	2,7E-11	7,4E-12
06-08-17	1,1E-11	1,4E-11	1,3E-09	0	0	2,9E-09
06-08-31	0	0	6,3E-10	0	0	4,1E-10
06-09-20	2,6E-09	7,4E-10	7,4E-10	0	0	4,8E-10
06-09-28	1,0E-08	6,4E-10	4,5E-10	0	0	4,1E-10
06-10-06	8,8E-11	7,7E-11	9,6E-11	0	0	2,0E-10
06-10-11	0	0	4,1E-10	0	0	0
06-10-18	7,3E-10	6,1E-09	0	0	0	0
06-10-25	4,1E-10	1,2E-08	3,8E-10	0	0	0
07-05-25	5,2E-11	1,3E-10	1,2E-10	0	2,5E-10	1,8E-11
07-06-06	9,2E-11	2,8E-11	2,1E-11	0	6,1E-12	0
07-06-14	1,8E-11	3,7E-11	8,3E-11	0	3,7E-11	6,4E-11
07-06-28	0	0	0	0	0	0
07-07-04	0	0	0	0	0	0
07-07-13	0	0	0	0	0	0
07-07-26	0	0	0	0	0	0
07-08-09	8,1E-11	9,5E-12	2,0E-10	0	0	7,3E-11
07-08-29	7,4E-12	7,4E-12	4,3E-10	0	0	5,4E-10
07-09-11	2,3E-11	6,2E-11	6,2E-11	0	0	1,5E-10
07-09-26	1,8E-10	5,4E-11	9,6E-10	0	0	5,9E-11
07-10-09	1,2E-10	2,0E-10	7,9E-10	0	0	1,4E-10
07-10-30	1,1E-10	7,0E-11	1,6E-10	0	0	6,0E-11
moyenne 2007	5,3E-11	3,9E-11	2,3E-10	0,0E+00	3,6E-12	9,1E-11
moyenne 2006	1,2E-09	1,6E-09	3,8E-10	9,0E-12	1,4E-11	4,0E-10

* Débit = Volume d'eau récolté / temps écoulé depuis la dernière mesure / aire transversale du lysimètre

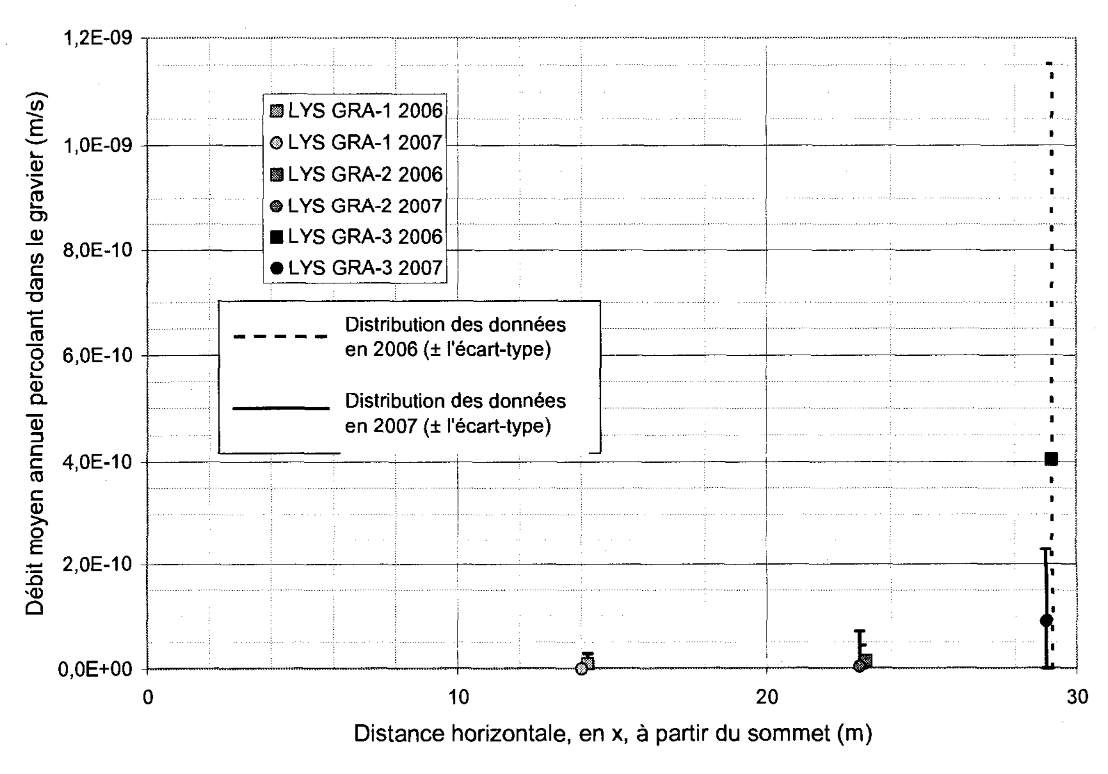


Figure 4-19 - Analyse spatiale des débits annuels moyens de percolation dans le gravier, 2006 et 2007

En 2007, la quantité d'eau récoltée au LYS-GRA-2 est nulle (sauf pour le printemps, voir le Tableau 4-3 et la Figure 4-19). Il est donc possible d'affirmer que la LT serait plus élevée que 24 mètres à partir de la mi-juin 2007. Ces conclusions se rapprochent de celles réalisées par l'étude des succions à la section précédente.

Quoi qu'il en soit, en tout temps, le lysimètre GRA-3, situé à l'extrême aval de la BC, ne récolte pas un débit plus élevé que $3x10^{-9}$ m/s. L'objectif du recouvrement alternatif, qui est de dévier le débit de percolation de $5x10^{-9}$ m/s jusqu'à 30 mètres pour éviter l'entrée d'eau dans les déchets, est donc atteint.

4.2.5 Synthèses des résultats et discussion

Barrière hydraulique

- L'analyse des teneurs en eau et des succions mesurées montre que le SPD, à sa base, demeure saturé en 2006. Si le tassement du SPD et la variation des propriétés hydrauliques sont considérés, le SPD demeure aussi saturé à sa base en 2007.
- L'étude d'un duo de sonde de teneur en eau/tensiomètre a montré que les propriétés hydrauliques du SPD varient dans le temps. La θ_{sat} diminue, passant de 75 % à 66 %. La φ_{VEA} semble augmenter aussi en 2007 par rapport à 2006.
- L'analyse des succions mesurées montre que l'apport d'eau à la barrière capillaire augmente constamment en se dirigeant de l'amont vers l'aval en 2006. Cet apport d'eau, pour 2007, augmente plutôt dans la zone entre 18,0 mètres et 22,4 mètres.

Barrière capillaire

- L'analyse des succions mesurées montre que le haut de la couche de sable classe A demeure sec.
- L'analyse des succions mesurées montre aussi que la LT $\approx$ 23 mètres en 2006 et que LT $\geq$ 23 mètres, en 2007.
- L'analyse de fiabilité des lysimètres en 2006 a montré que les lysimètres installés dans le sable sont représentatifs pour le volume d'eau récolté. Cependant, à cause d'une défaillance du drainage, le débit peut être biaisé. En 2007, ces lysimètres sont drainés

plus adéquatement. Cependant, une différentielle de succion entre le centre du lysimètre et l'extérieur de ce dernier, à son sommet, pourrait entraîne une sous-estimation d'environ 45 % du volume d'eau récolté.

- Aux fins de la modélisation, l'apport d'eau sera considéré constant dans l'espace. Par la moyenne des lysimètres installés dans le sable : $q_{solicitation\ 2006} = 1x10^{-9}$ m/s; $q_{solicitation\ 2007} = 2x10^{-10}$ m/s. Ces valeurs sont corrigées pour tenir compte de la sous-estimation du débit causée par le différentiel de succion au sommet du lysimètre.
- Puisque les lysimètres situés dans le gravier ont été surdimensionnés de plus de 40 %, ces derniers ont été jugés fonctionnels.
- L'analyse des résultats des lysimètres installés dans le gravier permet de conclure que la LT varie entre 24 mètres et 29 mètres en 2006 et est plus élevé que 24 m à partir de l'été 2007.
- L'augmentation de la performance de la BC dans le temps ne serait pas causée par des sollicitations météorologiques plus favorables en 2007, par rapport à 2006. En effet, en 2007, une précipitation totale plus élevée et un nombre d'événements extrêmes plus faible sont observés, comparativement à 2006 (Figure 4-5). Ainsi, davantage d'infiltrations au travers du tout-venant seraient probables en 2007, par rapport à 2006.

La Figure 4-20 présente le sommaire pour ce qui a trait aux écoulements dans le recouvrement alternatif étudié sur le terrain.

Quoi qu'il en soit, en tout temps, le lysimètre LYS-GRA-3, situé quasiment à l'extrémité aval de la BC, ne collecte pas un débit plus élevé que celui du design de la BC ($5x10^{-9}$m/s). L'objectif du recouvrement alternatif, qui est de dévier le débit de percolation au-delà de 30 mètres pour éviter l'entrée d'eau dans les déchets, est donc atteint.

Il a été démontré plus haut que la LT interprétée grâce à des données du terrain est variable dans le temps, selon les conditions météorologiques et le tassement du SPD. Cependant, cette LT varie entre 23 mètres et une longueur plus élevée que celle de la BC. Comment concilier ces observations *in situ* avec les conclusions amenées à la section 4.1.3. À cette section, il a été montré que la LT théorique de la BC pouvait être beaucoup plus faible, selon les propriétés

des matériaux retenues. Ceci tend à montrer que la LT est probablement très sensible aux propriétés des matériaux composant la BC. Il se pourrait que les matériaux mis en place sur le terrain possèdent des propriétés hydrauliques différentes de celles évaluées en laboratoire. Cette différence pourrait entraîner une augmentation drastique de la LT. Cet aspect sera analysé plus en détail à la section 4.3.

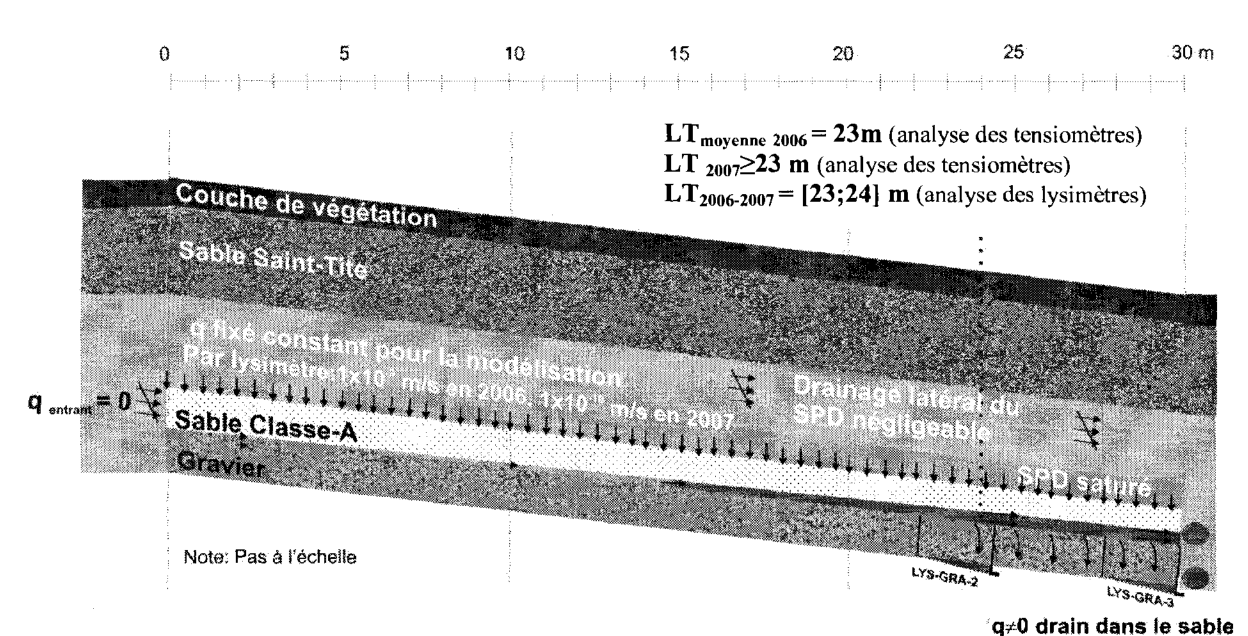


Figure 4-20 - Sommaire des écoulements observés sur le terrain, cellule expérimentale

4.3 Modélisation du recouvrement alternatif

4.3.1 Débit arrivant à la barrière capillaire

4.3.1.1 Mise en contexte et rappel

Une couche de SPD a été ajoutée au-dessus de la BC pour diminuer et contrôler l'apport d'eau atteignant la CRC. Pour effectuer adéquatement les modélisations, il est nécessaire de quantifier l'arrivée d'eau au sommet de cette BC. Pour ce faire, le logiciel Visual HELP est utilisé. À la section 3.1.5.1, la valeur du k_{sat} du SPD lors de sa mise en place a été évaluée à $1x10^{-8}$ m/s. Il a été démontré, cependant, qu'entre 2006 et 2007, il y a eu une diminution du k_{sat} d'un ordre de grandeur environ.

4.3.1.2 Modélisation sur Visual HELP

Les conditions climatiques retenues sont celles mesurées sur le terrain par la station météorologique (pour l'humidité et la vitesse du vent) et celle des archives météorologiques pour la ville de Québec (pour la température et les précipitations). Dans tous les cas, la moyenne des années 2006 et 2007 a été réalisée. Les propriétés des matériaux utilisées pour la modélisation sont présentées à l'annexe N. Les résultats de cette modélisation sont présentés à la Figure 4-21.

4.3.1.3 Conclusions sur le débit percolant le SPD

La plage de débit percolant à travers la couche de SPD, et donc atteignant le sommet de la BC, variera entre la valeur du k_{sat} du SPD et le critère de conception du débit 85 % (15 % seulement des infiltrations y sont inférieures). En effet, on rejette l'hypothèse d'un gradient vertical supérieur à l'unité, ceci limite donc le débit de percolation maximal à la valeur du k_{sat} des SPD. La Figure 4-21 présente des débits de percolation plus élevée que $1x10^{-8}$ m/s. Il est peu probable que ce débit dépasse, dans la réalité, la k_{sat} du SPD. En effet, ceci signifierait qu'il y a accumulation d'une charge d'eau sur la couche de SPD. Ces valeurs sont probablement causées par les limites du modèle, déjà présentées à la section 3.3.

Pour 2006, c'est-à-dire avec la valeur de $1x10^{-8}$ m/s pour la k_{sat} des SPD, la plage de débits de percolation retenue est donc de : [$6x10^{-9}$;$1x10^{-8}$] m/s. Considérant, tel que mentionné précédemment, que la perméabilité saturée du SPD diminue d'un ordre de grandeur de 2006 à 2007, la plage de débits atteignant le sommet de la couche de sable pour les deux années sera fixée à : [$6x10^{-10}$ m/s;$1x10^{-8}$] m/s.

➢ Afin de simplifier la modélisation, la plage retenue sera de : [$1x10^{-10}$ m/s;$1x10^{-8}$] m/s.

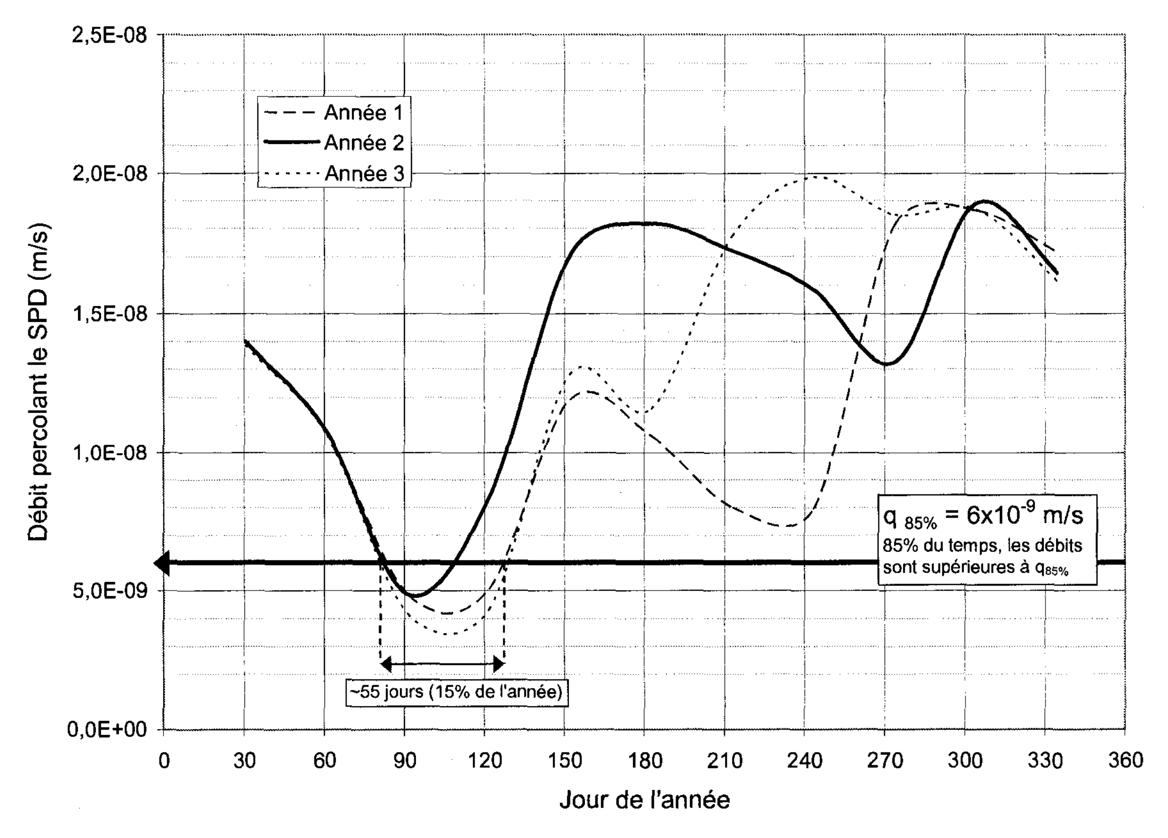


Figure 4-21 - Modélisation sur Visual HELP, débit percolant le SPD, atteignant CRC, ksat SPD=$1x10^{-8}$ m/s

4.3.2 Élaboration du modèle sur Hydrus et SEEP/W : la barrière capillaire

4.3.2.1 Présentation du modèle sur Hydrus

Pour le modèle réalisé avec le logiciel Hydrus, les conditions contours appliquées sont les suivantes :

- Le débit d'une simulation à l'autre varie entre 1×10^{-10} m/s et 1×10^{-8} m/s, tel que conclu à la section 4.3.1.
- Une condition de drainage est appliquée seulement à la base du gravier, ainsi qu'à la section verticale inférieure à l'extrême droit pour le sable et le gravier (pour simuler les drains). Cette condition est simulée avec un gradient unitaire hydraulique vertical (Šimůnek et al., 2006).
- Aucun flux pour les autres frontières (section verticale supérieure à l'extrême droite pour le sable et le gravier et la section verticale à l'extrême gauche).

Pour les conditions initiales, une teneur en eau de 10 % a été retenue (état non saturé). Les tolérances, les *pas de temps* retenus et le nombre de mailles sont présentés au Tableau 4-5, à la colonne *maillage ordinaire tolérance ordinaire.* Une attention particulière a été prise pour obtenir un maillage suffisamment fin à la base de la couche de sable, comme le montre la Figure 4-22. La pente abrupte des FCH des matériaux fait en sorte que pour un petit changement de succion (φ), il advient un grand changement de la perméabilité (k), ce qui déstabilise le modèle. Le maillage doit donc être fin là où on envisage des succions variables, dans ce cas-ci à la base de la couche de sable.

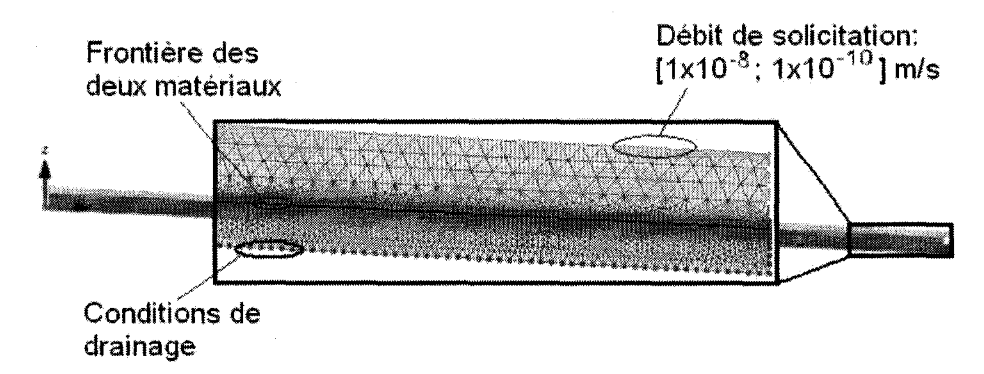


Figure 4-22 - Modèle retenu sur Hydrus

4.3.2.2 Présentation du modèle sur SEEP/W

Pour le modèle réalisé sur SEEP/W, une couche de déchet a été ajoutée sous la couche de sable. Les propriétés des déchets ont été obtenues grâce à la banque de données de matériaux de Geo-Slope (Geostudio). Les conditions contours retenues sont les suivantes :

- Le débit d'une simulation à l'autre varie entre $1x10^{-10}$ m/s et $1x10^{-8}$ m/s, tel que conclu à la section 4.3.1.
- Une pression d'eau nulle a été appliquée à la base de la couche de déchet, simulant une nappe phréatique. Des conditions de drainage, lorsqu'il y a accumulation d'eau (seulement) ont été appliquées aux positions des drains en aval de la cellule.
- Aucun flux pour les autres frontières (section verticale supérieure à l'extrême droite pour le sable et le gravier et la section verticale à l'extrême gauche).

Les tolérances, les *pas de temps* retenus et le nombre de mailles sont présentés au Tableau 4-6, à la colonne *maillage fin, tolérance ordinaire*. Une attention particulière a été prise pour obtenir un maillage suffisamment fin à la base de la couche de sable (Figure 4-23), pour les mêmes raisons que celles expliquées ci-haut (section 4.3.2.1).

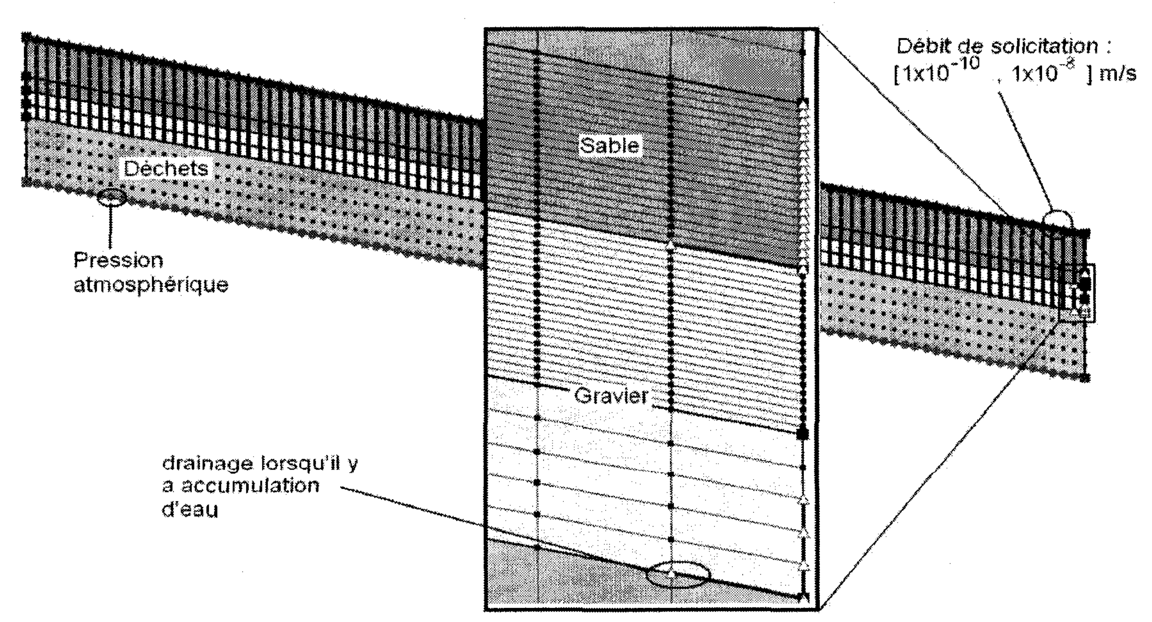


Figure 4-23 - Modèle retenu sur SEEP/W

4.3.2.3 Étude de sensibilité au maillage et à la tolérance du modèle proposé sur Hydrus

La taille du maillage et les critères de tolérance à la convergence retenus peuvent influencer les réponses fournies par le modèle. En effet, si le maillage est trop grossier, ou si la tolérance n'est pas assez sévère, les valeurs fournies par la modélisation peuvent être biaisées. Ainsi, une étude de sensibilité à ces paramètres a été réalisée sur le modèle d'Hydrus. Le modèle proposé, soit celui avec le maillage fin et la tolérance ordinaire, n'entraîne pas de variation significative de la réponse (vitesse en XY tout juste en dessous de l'interface sable/gravier, $\approx V_Y$) lorsque le maillage est raffiné et la tolérance rendue plus sévère. En effet, les vitesses mesurées par ces modèles sont équivalentes (Tableau 4-5). Les paramètres retenus sont donc adéquats (Tableau 4-4). Pour cette analyse, le modèle utilisé a été raccourci de 30 mètres à 5 mètres afin d'alléger la compilation. De plus, les propriétés de sols retenus sont celles estimées lors du *design*.

4.3.2.4 Étude de sensibilité au maillage et tolérance du modèle proposé sur SEEP/W

La taille du maillage et les critères de tolérance à la convergence retenus peuvent influencer significativement les réponses fournies par le modèle SEEP/W, tel qu'expliqué ci-haut pour Hydrus. Ainsi, une étude de sensibilité à ces paramètres a été réalisée sur le modèle de SEEP/W. Le modèle proposé, soit celui avec le maillage et la tolérance ordinaire, n'entraîne pas de variation significative de la réponse (vitesse en XY tout juste en dessous de l'interface sable/gravier, $\approx V_Y$) lorsque le maillage est raffiné et la tolérance rendue plus sévère (Tableau 4-7). Les paramètres choisis sont donc adéquats (Tableau 4-6). Pour cette analyse, les propriétés des sols retenus sont celles évaluées avec la table de succion.

Tableau 4-4 - Trois scénarios de maillage et de tolérance étudiés pour le modèle sur Hydrus

	Maillage ordinaire, tolérance ordinaire	Maillage fin, tolérance ordinaire	Maillage très fin, tolérance ordinaire	Maillage fin, tolérance plus sévère
Position en y	taille maille	taille maille	taille maille	taille maille
0 à 10 cm	10 cm	5 cm	2 cm	5 cm
10 cm à 20 cm	10 cm	5 cm	0.5 cm	5 cm
20 cm à 25 cm	2 cm	1 cm	0.5 cm	1 cm
25 cm à 35 cm	10 cm	5 cm	2 cm	5 cm
35 cm à 60 cm	15 cm	10 cm	5 cm	10 cm
Δt initial (h)	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-10	1,00E-12
Δt min (h)	2,80E-11	2,80E-11	2,80E-11	2,80E-13
Δt max (h)	10	10	10	10
Nbr. itération max	40	40	40	50
Tolérance θ	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001
Tolérance φ	0,1	0,1	0,1	0,001
Limite inférieure au changement de Δt	3	3	3	2
Limite supérieure au changement de Δt	7	7	7	5
Facteur augmentateur	1,1	1,1	1,1	1,05
Facteur diminuateur	0,2	0,2	0,2	0,1
Limite supérieure interpolation	0,01	0,01	0,01	0
Limite inférieure interpolation	200	200	200	0

Tableau 4-5 - Étude de la sensibilité du modèle d'Hydrus aux différents scénarios : maillage et tolérance

Débit de solicitation (m/s)	Distance, selon la pente depuis l'amont (m)	Vitesse tout juste en dessous l'interface sable-gravier (V_{XY}) (m/s)			
		Maillage ordinaire, tolérance ordinaire	Maillage fin, tolérance ordinaire	Maillage très fin, tolérance ordinaire	Maillage fin, tolérance plus sévère
$1x10^{-10}$	1	8,35E-11	8,48E-11	8,09E-11	8,50E-11
$1x10^{-10}$	2	8,41E-11	8,56E-11	8,17E-11	8,60E-11
$1x10^{-10}$	3	8,41E-11	8,36E-11	8,44E-11	8,60E-11
$1x10^{-10}$	4	8,32E-11	8,14E-11	8,09E-11	8,16E-11
$1x10^{-9}$	1	7,97E-10	7,95E-10	7,51E-10	7,96E-10
$1x10^{-9}$	2	7,99E-10	7,98E-10	7,52E-10	7,98E-10
$1x10^{-9}$	3	8,00E-10	7,98E-10	7,72E-10	7,98E-10
$1x10^{-9}$	4	7,97E-10	7,63E-10	7,70E-10	7,63E-10

Tableau 4-6 - Quatre scénarios de maillage et de tolérance étudiés pour le modèle sur SEEP/W

	Maillage ordinaire, tolérance ordinaire	Maillage ordinaire, tolérance plus sévère	Maillage plus fin, tolérance ordinaire
Nbr. de mailles horizontales	100	100	150
Nbr. de maille verticales dans le sable	30	30	40
Nbr. de mailles verticales dans le gravier	25	25	35
Nbr. maximal itération	10000	20000	10000
Tolérance	$1x10^{-6}$	$1x10^{-7}$	$1x10^{-6}$
Ordre de grandeur du changement de la conductivité: maximum	0,05	0,025	0,05
Ordre de grandeur du changement de la conductivité: minimum	$1x10^{-10}$	$1x10^{-12}$	$1x10^{-10}$
Taux de changement	1,005	1,0025	1,005
Nbr. de revision de l'infiltration	3	10	3

Tableau 4-7 - Étude de la sensibilité du modèle sur SEEP/W aux différents scénarios de maillage et de tolérance

Débit de solicitation	Distance en X depuis le haut de la pente	Vitesse en Y à l'interface sable gravier		
		Maillage ordinaire, tolérance ordinaire	Maillage ordinaire, tolérance plus sévère	Maillage plus fin, tolérance ordinaire
(m/s)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
$1x10^{-9}$	0,3	4,10E-10	4,10E-10	4,08E-10
$1x10^{-9}$	0,6	6,22E-10	6,22E-10	6,12E-10
$1x10^{-9}$	0,9	8,07E-10	8,07E-10	8,00E-10
$1x10^{-9}$	1,2	9,79E-10	9,79E-10	9,72E-10
$1x10^{-9}$	1,5	1,13E-09	1,13E-09	1,12E-09
$1x10^{-10}$	0,3	2,83E-11	2,83E-11	2,82E-11
$1x10^{-10}$	0,6	4,36E-11	4,37E-11	4,30E-11
$1x10^{-10}$	0,9	5,76E-11	5,76E-11	5,72E-11
$1x10^{-10}$	1,2	7,13E-11	7,13E-11	7,09E-11
$1x10^{-10}$	1,5	8,44E-11	8,44E-11	8,40E-11

4.3.2.5 Détermination de l'état permanent sur Hydrus

Contrairement à SEEP/W, Hydrus ne modélise pas l'état permanent. En effet, le modélisateur n'obtient que les résultats associés à un moment précis, déterminé par lui. Si ce temps est suffisamment long, la réponse sera stable dans le temps (puisque les conditions contours sont fixes) et ces valeurs pourront être associées à l'état permanent. Dans ces conditions, ces résultats pourront être comparés avec SEEP/W, qui, pour sa part, modélise l'état permanent. Pour différents débits de sollicitation ($1x10^{-10}$ m/s à $1x10^{-8}$ m/s), la réponse est devenue stable à partir de 6 mois.

En effet, les valeurs obtenues pour 1 an de simulation ne sont pas significativement différentes des valeurs obtenues pour 6 mois. L'état permanent sur Hydrus, aux fins de ce présent mémoire, est donc fixé comme celui obtenu à partir de 6 mois de modélisation.

4.3.3 Évaluation de la longueur de transfert en régime permanent

Des modélisations ont été réalisées sur les deux logiciels de simulation (SEEP/W et Hydrus), pour différents débits et pour différentes propriétés des sols composants la BC. Les résultats sont présentés à la Figure 4-24. Il est possible d'observer que les LT obtenues par modélisation pour les différents débits de sollicitation sont faibles (LT $\leq$ 8,2 mètres, si on ne considère pas les propriétés fournies par l'essai de colonne pour le sable). Ces valeurs sont inférieures à celle observées sur le terrain. Cependant, si on considère l'essai de colonne (72 h) pour les propriétés du sable, la LT augmente significativement pour atteindre une valeur plus élevée que 40 mètres sur SEEP/W. Pour ce dernier logiciel, le modèle a été allongé de 20 mètres (pour atteindre 50 mètres). Pour Hydrus, tout ce qu'il est possible de dire est que la LT est supérieure à 30 mètres, car le modèle n'a pas été allongé. Ces LT modélisées sont comparables aux analyses du comportement théorique réalisées à la section 4.1.3. Ces analyses, basées sur Ross (1990), sont aussi répétées à la Figure 4-24.

Les LT sont évaluées à l'aide de l'Équation 2-18. De plus, à la LT théorique, fournit par (Ross, 1990), on observe un q_i sur les modèles d'Hydrus et de SEEP/W se situant à l'intérieur de la plage des points expérimentaux de Parent et Cabral (2006a), présenté à l'annexe O. Dans

le cas de la BC étudiée ici, ces débits sont, sur SEEP/W : 51 % à 60 % de q, pour $q=1x10^{-8}$ m/s; 56 % à 59 % de q, pour $q=1x10^{-9}$ m/s; 59 % à 61 % de q, pour $q=1x10^{-10}$ m/s). Ce fait conforte donc la validité de l'analyse réalisée par les modélisations.

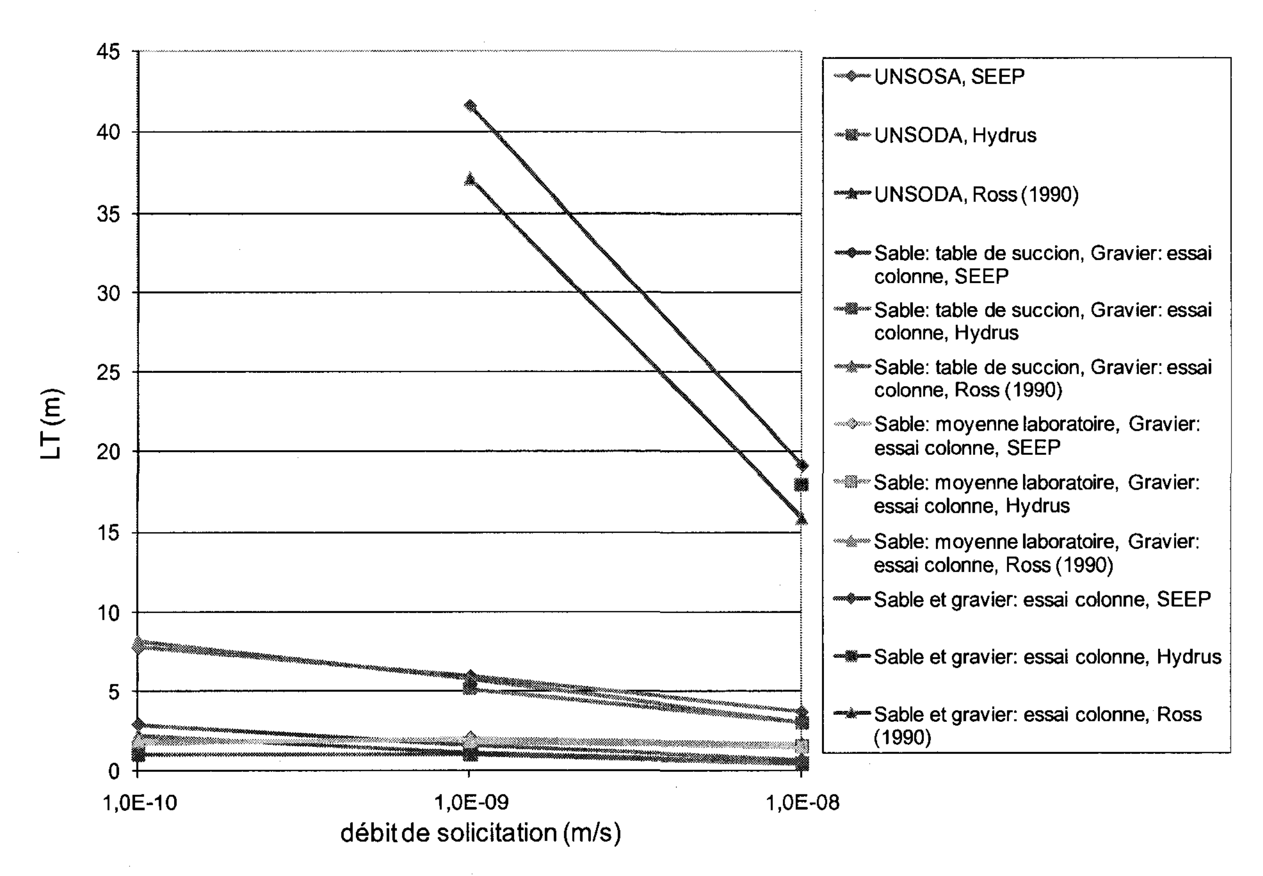
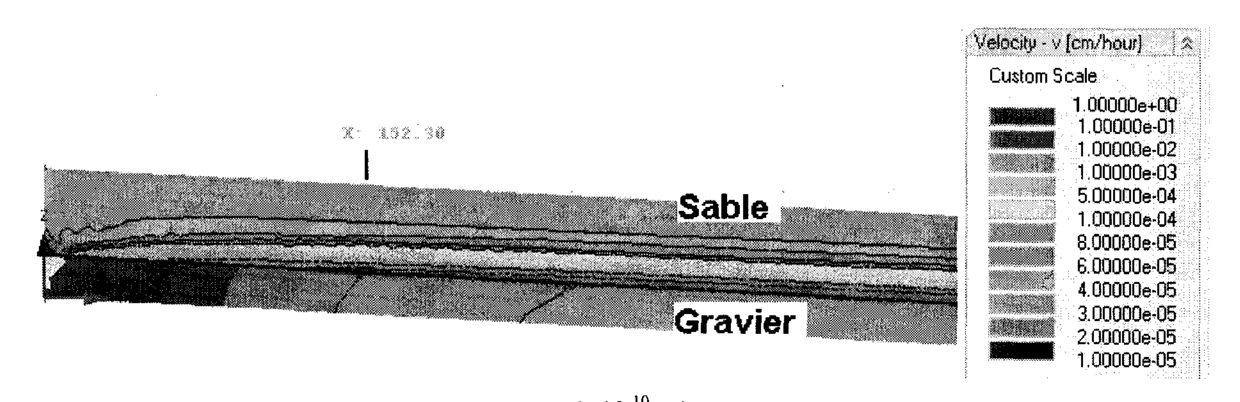


Figure 4-24 - LT modélisées sur SEEP/W et sur Hydrus et LT théorique (Ross, 1990), pour différents débits, et pour différentes propriétés des matériaux

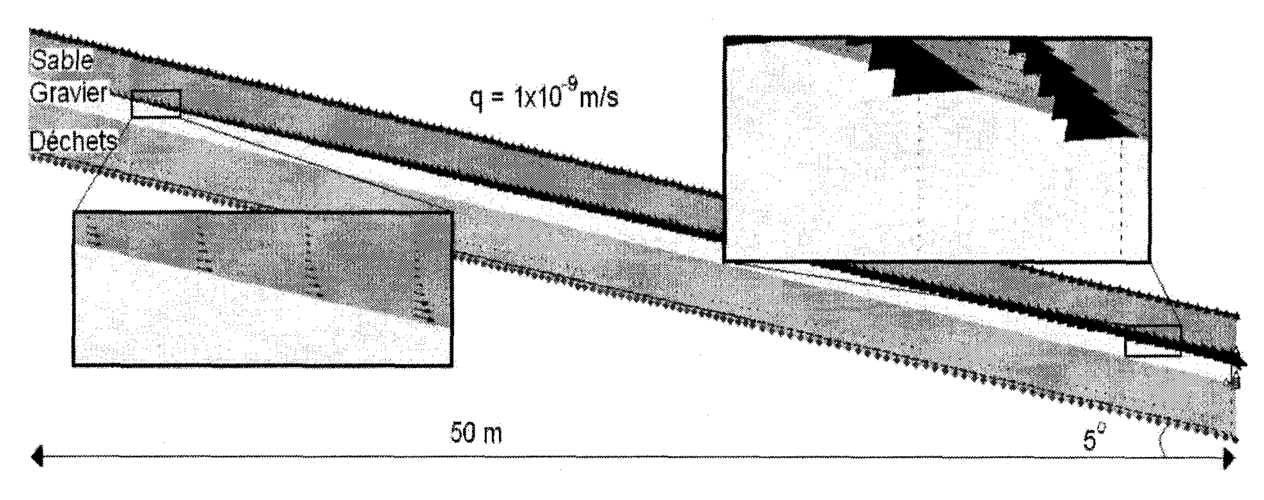
La Figure 4-25 présente un exemple typique des simulations pour une faible valeur de LT (Hydrus, $1x10^{-10}$ m/s, propriétés du sable : table de tension, propriétés du gravier : table de tension + UNSODA). L'écoulement devient important à l'interface CBC/CBC et que la valeur du débit de sollicitation est rapidement atteinte dans le gravier (autour de 1,5 mètre, $3,6x10^{-7}$ m/h ou $3,6x10^{-5}$ cm/h). La Figure 4-26 présente, quant à elle, un exemple caractéristique des simulations pour de hautes valeurs de LT (SEEP/W, $1x10^{-9}$ m/s, propriétés du sable : essai de colonne (72 h), propriétés du gravier : table de tension+ UNSODA). Le sable, le long de l'interface CBC/CRC, draine l'eau. Ce n'est que vers le bas de la pente que les infiltrations dans le gravier deviennent considérables.



$q = 1x10^{-10}$ m/s

Propriétés des matériaux : sable : table de tension; gravier : table de tension + UNSODA

Figure 4-25 - Simulation numérique typique sur Hydrus



Propriétés des matériaux : Sable : essai de colonne (72 h) ; gravier : essai table de tension

Figure 4-26 - Simulation numérique typique sur SEEP/W

En conclusion, la LT est très sensible aux propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation. Les essais en laboratoire ainsi que les banques de données, tel UNSODA, donnent un aperçu de ces propriétés. Cependant, en restant dans la plage offerte pour ces propriétés, la LT varie considérablement.

4.3.4 Évaluation de la longueur de transfert, en état transitoire

Une étude en régime transitoire pourrait être réalisée sur SEEP/W. Pour saisir la pertinence de cette possibilité, il faut noter une problématique rencontrée lors des modélisations présentées dans ce mémoire. En régime permanent, les conditions contours modélisant le drain sur SEEP/W (aval de la cellule) n'évacuent pas adéquatement l'eau provenant du sable. De ce

fait, une quantité d'eau semble être forcée de pénétrer dans le gravier (sur les 2 derniers mètres de la BC). Ce problème n'a pas eu de conséquence pour les résultats présentés dans ce mémoire, car les LT modélisées ne se situaient pas dans les derniers 2 mètres. Un échange avec le concepteur du logiciel SEEP/W mentionne que le régime permanent, qui modélise l'état final après un temps infini, est probablement l'origine de ce problème.

De plus, avec l'état transitoire sur SEEP/W, les conditions contours pourront être variables en fonction du temps. La modélisation sur Visual HELP et les observations sur le terrain montrent que le débit percolant au travers du SPD est variable selon les années (ce mémoire en tient compte), mais aussi variable selon les mois. Le régime transitoire pourra tenir compte de ces variations mensuelles.

4.3.5 Synthèses des résultats : efficacité modélisée du recouvrement alternatif

Bref, selon les résultats de la modélisation, le recouvrement alternatif peut être efficace pour atteindre de grandes LT dans la BC pour certaines caractéristiques de la CRC. Cependant, pour atteindre des LT élevées, il faut remplir certains critères. En gardant constantes les propriétés hydrauliques du gravier et en supposant que la k_{sat} du sable évaluée par la granulométrie est représentative, la φ_{VEA} ($1/\alpha$, selon van Genuchten, 1980) et la pente de désaturation (n) du sable doivent être fixées parmi les plus élevées de la plage de données des essais de laboratoire et des banques de données.

Puisque les résultats sur le terrain montrent une LT d'au minimum 23 mètres, il semblerait que les propriétés réelles du sable se situent dans les limites de cette plage.

5 DISCUSSIONS SUR LE *DESIGN* PROPOSÉ EN 2005 : RÉVISION SELON LES RÉSULTATS OBSERVÉS ET MODÉLISÉS

La conception de la CEBC de Saint-Tite-des-Caps, réalisé en 2005, tient compte des propriétés des matériaux estimées avec l'aide de banques de données. Les expérimentations en laboratoire, tel que démontré plus haut, ont précisé les caractéristiques des matériaux, celles-ci divergent quelque peu des propriétés retenues lors du design. De plus, la conception réalisée n'a pas pris en compte le tassement du SPD dans le temps, ce qui entraîne une diminution de la conductivité hydraulique de ce matériau et, ainsi, une diminution du débit de sollicitation atteignant la BC. L'efficacité observée sur le terrain du recouvrement alternatif permet aussi de jeter un regard critique sur la conception.

Ce chapitre présente donc une revue du *design* (lysimètre, épaisseur des couches et choix des matériaux) en tenant compte de ces nouvelles réalités.

5.1 *Design* des lysimètres

Les FCH évaluées à partir des données expérimentales, déjà présentées à la Figure 4-2, sont répétées à la Figure 5-1. Pour ces données obtenues expérimentalement et pour le débit 85 % de $6x10^{-9}$ m/s, associé au k_{sat} de 2006 et évalué par Visual HELP (Figure 4-21), la succion maximale que le sable peut développer se situe autour de 3,5 kPa. Pour le débit 85 % ($6x10^{-10}$ m/s) estimé à partir de Visual HELP (Figure 4-21) pour les conditions de 2007, la succion maximale que le sable peut développer se situe autour de 4 kPa. Le lysimètre devrait donc avoir au moins 40 cm (Figure 2-6). Le *design* réalisé initialement (60 cm) répond à cette exigence. Ceci ne veut pas dire que le lysimètre sera entièrement fonctionnel. Un débit plus faible peut survenir (15 % du temps) et biaiser les lectures du lysimètre.

Pour la FCH provenant de la banque de données UNSODA, la hauteur du lysimètre devrait être de 80 cm (pour le pire scénario, $q=6x10^{-10}$ m/s). Pour ce cas, concrètement, ceci voudrait dire que les lysimètres, au lieu de fonctionner adéquatement 85 % du temps, le feraient

environ 75% du temps, Figure 4-21. Ceci représente une petite baisse d'efficacité, comme celle observée par les tensiomètres (4.2.4.3).

Cependant, il a été démontré au chapitre 4 que le sable classe A doit avoir une pente de désaturation (n) abrupte pour obtenir une LT telle qu'observée sur le terrain. En ce sens, les propriétés fournies par les essais de colonnes seraient plus représentatives du sable classe A présent sur le terrain que celles fournies par UNSODA. En considérant ceci, un lysimètre de 60 cm de haut serait donc suffisant.

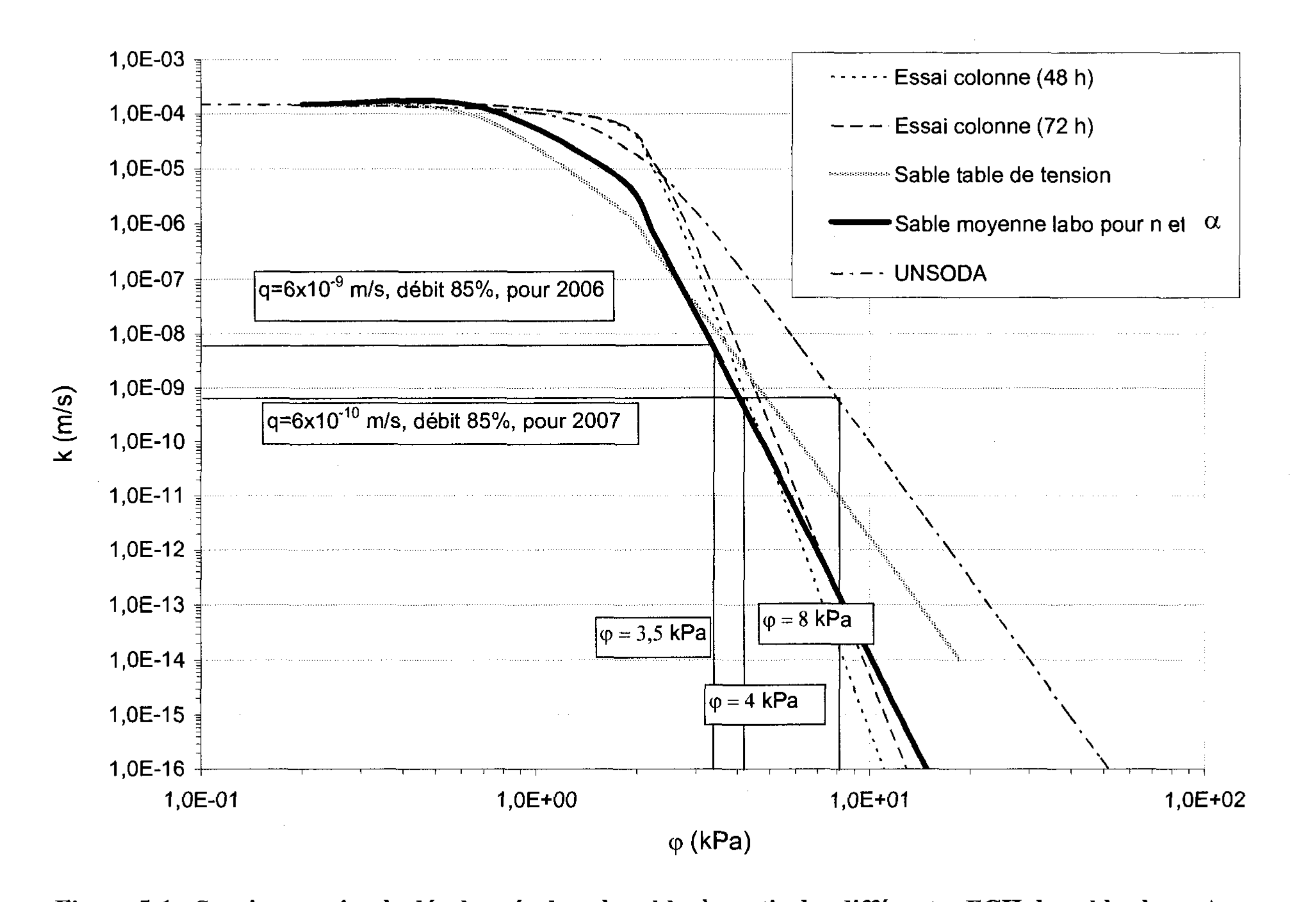


Figure 5-1 - Succion maximale développée dans le sable, à partir des différentes FCH du sable classe A

5.2 Choix et épaisseurs des matériaux

Les matériaux choisis lors de la conception répondent à l'objectif de fournir une LT tout juste en deçà de 30 mètres. En effet, l'efficacité observée sur le terrain permet de conclure que cette LT est, en moyenne, d'au moins 23 mètres.

5.2.1 Couche de SPD

L'épaisseur de conception pour la barrière hydraulique est de 60 cm. Le rapport de construction mentionne que la hauteur, telle que construite, est de 62,5 cm (Cabral et Bérubé, 2006). Les plaques de tassement présentent un tassement de 10 à 12 cm depuis la construction (Figure 4-11). L'épaisseur de cette couche de résidus, à la fin de 2007, serait d'au minimum 50 cm.

D'un point de vue de faisabilité légale, la barrière hydraulique pourrait, éventuellement, être associée à la couche imperméable (Figure 2-8). Dans ce cas, cette couche devrait être d'au moins 45 cm. Il semble qu'une épaisseur initiale de 60 cm pour ce matériau hautement compressible entraîne, à long terme, une épaisseur respectant ce critère.

5.2.2 Gravier

Comme le mentionnent Parent et Cabral (2006a), l'épaisseur minimale de la CBC est celle correspondant à l'atteinte de la succion de convergence dans un profil de succion dont la condition limite inférieure est la plus désavantageuse, soit l'existence d'une nappe phréatique (pression nulle). Le modèle de Kisch (1959) est utilisé pour représenter le profil de succion pour le gravier intermédiaire (Figure 5-2). Le débit retenu pour cette étude est celui où 85 % des infiltrations sont supérieures : $6x10^{-10}$ m/s (estimé à partir de la Figure 4-21, pour un $k_{sat} = 1x10^{-9}$ m/s). Pour ce point, un débit plus élevé est conservateur, car il impliquerait une diminution de l'épaisseur optimale de la CBC. La conception a fixé la valeur du débit $q_{85\%}$, comme débit de percolation à ne pas dépasser dans le gravier, à l'extrémité aval de la CEBC. Dans cette optique, le débit de sollicitation au sommet de la BC est plus élevé. Le débit d'infiltration doit donc être corrigé à $q=1,0 \times 10^{-9}$ m/s (Équation 2-18). Les propriétés du gravier retenues sont celles évaluées en laboratoire (Figure 3-26). Tel qu'indiqué à la Figure 5-2, cette analyse donne une épaisseur de 0,20 mètre, soit la valeur retenue pour le *design*. Accorder un surdimensionnement de 40 % lors de la conception de la couche de gravier aura donc été prévoyant.

5.2.3 Sable

La section 3.1.5.3 présente l'analyse qui permet de conclure que, avec les propriétés estimées lors de la conception, pour atteindre une LT de 30mètres, il a fallu une épaisseur de la CRC de 40 cm. Refaire cette analyse dépasse le cadre de ce mémoire.

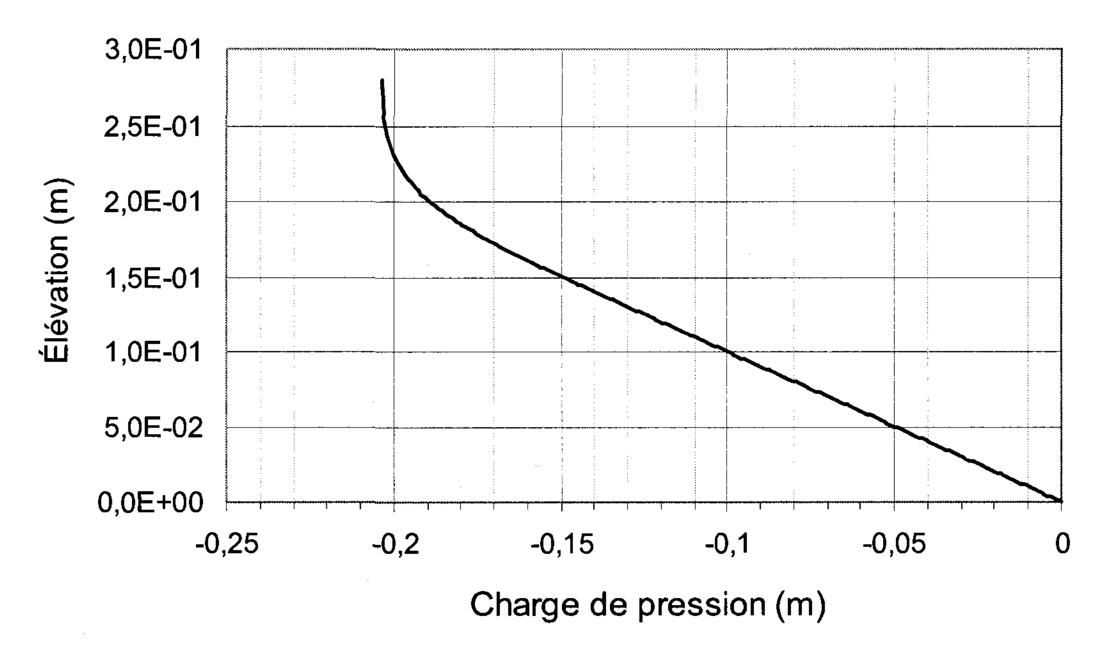


Figure 5-2 - Profil de succion dans le gravier, avec propriétés évaluées en laboratoire

5.3 Sommaire de la révision du *design*

Bref, à la lumière des caractéristiques évaluées en laboratoire et des observations sur le terrain, le design des lysimètres, l'épaisseur et le choix des matériaux retenus semblent adéquats, a posteriori, pour répondre aux objectifs fixés.

6 CONCLUSIONS

Une parcelle expérimentale construite sur le site d'enfouissement de Saint-Tite-des-Caps a pour but d'évaluer l'efficacité d'une CEBC. Cette dernière est constituée d'une barrière hydraulique composée de SPD, jumelée à une barrière capillaire constituée d'une couche de sable sur une couche de gravier. Pour faire le suivi de la performance de cette CEBC, des lysimètres, des tensiomètres, des sondes de teneurs en eau, des plaques de tassement et une station météorologique ont été installés. Pour étudier la validité de certains principes de conception retenus, ce recouvrement alternatif a été conçu de façon à ce que la LT soit juste inférieur à la longueur disponible pour la construction de la CEBC, soit 30 mètres. De plus, le choix des matériaux influence la conception des lysimètres; ces lysimètres devaient demeurer fonctionnels pendant toute la période d'étude.

L'objectif premier de ce projet était d'évaluer l'efficacité de ce recouvrement alternatif. L'étude de la variation des propriétés du SPD ainsi qu'une révision du *design* étaient aussi fixées comme autres objectifs.

Des essais en laboratoire ont été réalisés à partir d'une colonne de drainage et d'une table de succion, dans le but de déterminer les CRE des matériaux composant la BC. À l'aide de ces courbes, les régressions du modèle de van Genuchten (1980) permettent d'évaluer les FCH de ces mêmes matériaux, qui sont les principaux paramètres de design de la CEBC et des lysimètres. Finalement, à partir des FCH, il est possible d'évaluer la LT théorique. Au départ, on a pu remarquer que la LT est très sensible aux paramètres qui décrivent la CRE et la FCH. Comme la CRE a été obtenue selon différentes techniques – qui ont donné des résultats différents – les LT obtenues variaient sensiblement. Les données de terrain ont permis de mieux évaluer la LT et, ainsi, de préciser les propriétés hydrauliques réelles des matériaux.

L'analyse des données échantillonnées sur le terrain montre qu'entre 2006 et 2007, la k_{sat} des SPD diminue d'environ un ordre de grandeur, ce qui a pour conséquence que sa CRE et donc sa FCH varient elles-aussi. La base de la couche de SPD demeure saturée, tant en 2006 qu'en

2007. L'apport d'eau à la barrière capillaire (sable sur gravier) augmente selon une progression relativement constante, au fur et à mesure qu'on se dirige de l'amont vers l'aval. De plus, l'analyse des succions mesurées au moyen des tensiomètres et des quantités d'eau recueillies par les lysimètres, jugées fiables, permet de conclure que la LT varie 24 mètres et 29 mètres en 2006 et, à certains moments en 2007, est même plus élevée que les 30 mètres de la cellule expérimentale. En tout temps, le débit qui percole verticalement dans le gravier à l'extrémité aval de la CEBC est inférieur à $2,5 \times 10^{-10}$ m/s, c'est-à-dire inférieur aux normes les plus restrictives de conception de recouvrements dits imperméables. L'objectif du recouvrement alternatif, qui est de dévier le débit de percolation de *design* ($5x10^{-9}$m/s) sur 30 mètres pour éviter l'entrée d'eau dans les déchets est donc atteint avec le *design* proposé.

Une simulation a été réalisée avec le logiciel Visual HELP pour quantifier l'apport d'eau arrivant à la frontière entre les SPD et la couche de sable. Avec cette valeur, différentes simulations ont été réalisées avec les logiciels SEEP/W et Hydrus afin de vérifier si les critères de *design* s'avéraient exacts. Ces modélisations ont montré que la conception initiale était somme toute assez pertinente, car les mêmes LT obtenues sur le terrain ont été retrouvées par simulation numérique. Les simulations nous renseignent aussi qu'un recouvrement alternatif comme celui proposé pourrait permettre d'atteindre des LT beaucoup plus élevées, dépendamment des propriétés hydrauliques de la CRC.

Enfin, à la lumière des caractéristiques évaluées en laboratoire et des observations sur le terrain, le *design* des lysimètres, l'épaisseur et le choix des matériaux retenus semblent adéquats, *a posteriori*, pour répondre aux objectifs fixés.

- Réponse à l'objectif premier : évaluer l'efficacité du recouvrement alternatif proposé, en termes d'infiltration d'eau

Les résultats sur le terrain ont montré que le recouvrement alternatif est efficace pour dévier l'eau sur la base du débit de *design* ($5x10^{-9}$ m/s), sur la longueur fixé lors du *design*, soit de 30 mètres. Les simulations numériques ont montré, par contre, que l'efficacité de ce recouvrement est très sensible aux propriétés des matériaux.

- Réponses au sous-objectif de l'évaluation du comportement du SPD dans le temps ainsi qu'à l'objectif secondaire de la révision du *design*

Le *design* réalisé il y a quelques années s'est montré, après rétroaction, adéquat. Une des principales raisons qui expliquent ceci est les marges de sécurité qui ont été appliquées lors de la conception. Sur un autre aspect, la variation des propriétés hydrauliques du SPD n'a pas été considérée lors du *design*. Ceci fournit aussi une marge de sécurité à moyen et long terme quant au débit d'eau, en termes de m^3/s, atteignant les déchets.

Une partie du travail de ce mémoire a été d'analyser la variation temporelle des propriétés du recouvrement alternatif dans le temps. Puisque le site expérimental est suivi depuis seulement deux ans, les conclusions sur ces variabilités sont partielles. Les questions qu'il est possible de se poser concernent la barrière hydraulique. Le tassement du SPD va-t-il se stabiliser dans le temps? Le débit de percolation traversant ce matériau va-t-il encore diminuer en 2008? Si ce débit diminue encore, l'efficacité des lysimètres devra être sérieusement remise en question. En général, les résultats qui seront récoltés lors de l'année 2008 aideront à confirmer la tendance des variations des propriétés hydrauliques du recouvrement alternatif.

Comme prochains travaux, il serait pertinent de faire des essais de perméabilité sur les matériaux constituant la CEBC. En particulier, les conductivités hydrauliques saturées du sable classe A et du gravier ont été évaluées à partir de leur granulométrie respective. Des essais au laboratoire pourraient venir préciser ces valeurs. Pour les modélisations numériques, le recouvrement alternatif en entier, avec la barrière hydraulique, pourrait, finalement, être simulée grâce à Vadose/W de GeoStudio. Cette modélisation, qui considérerait les effets d'évapotranspiration, pourrait inclure, en régime transitoire, les données météorologiques mesurées in situ. Cette approche aurait comme avantage de se rapprocher des conditions réelles observées sur le terrain.

BIBLIOGRAPHIE

Abdolahzadeh, A. M., Lacroix Vachon B. et Cabral, A. 2008. Hydraulic barrier and its impact on the performance of cover with double capillary barrier effect. Comptes rendus de la 61e conférence de la société canadienne de géotechnique, Edmonton.

Aït-Benichou, S., Cabral, A.R. et Panarotto, C.T. 2006. Evolution of biodegradation of deinking by-products used, Waste Management,10.

Arya, L.M., Leije, F.J., van Genuchten, M.T., et Shouse, J.P. 1999. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution. Soil Science Society of America Journal, 63: 510-519.

Arya, L.M., et Paris, J.,F. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, Soil Science Society of America Journal, 45: 1023-1030.

Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.F. et Tremblay, L. 1995. Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers -. Rapport final NEDEM/ NEDEM 2.22.2a.

Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M., et Chapuis, R.P. 1996. Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols, Hydrogéologie, 1: 3-13.

Aubertin, M., Chapuis, R., Bouchentouf, A., et Bussière, B. 1997. Unsaturated flow modelling of inclined layers for the analysis of covers. *Dans* Proceedings, Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, Canada, Vol. 2, p. 731-746.

Bédard, D. 2005. Effet du fluage à long terme des sous-produits de désencrage dû à la perte de masse et son effet sur la compression et la conductivité hydraulique, M.Sc.A, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Benson, C. et Gribb, M. 1997. Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the

laboratory and field. Unsaturated Soil Engineering Practice. Houston, S. and Wray, W. eds. 113-168.

Bews, B.E., O'Kane, M., Wilson, G.W. et Williams,D. 1997. The design of a low flux cover system, including lysimeters, for acid generating waste rock in semi-arid environments. Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Mine Drainage, Volume II.

Brooks, R.H. et Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media, Hydrology paper no. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data, Pet. Trans. of the Amer. Inst. of Mining and Metal. Eng., 198: 71-77.

Bureau de Normalisation du Québec. 1987. Sols - Analyse granulométrique des sols inorganiques. CAN/BNQ 2501-025, Conseil canadien des normes, Ottawa.

Billiotte, J., Bourgeois, M., Deveughele, M., Jacquard C. et Arnould, M., 1988. Étude d'un système bicouche sol fin - sol grossier à effet de barrière capillaire, Comptes rendus de la conférence internationale sur l'hydrogéologie, sécurité nucléaire et site d'enfouissement de déchets dangereux, document 160, p. 149-161, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France, 7-10 juin 1998.

Burnotte, F., Lefebvre, G., Cabral, A., Audet, C. et Veilleux, A. 2000. Use of deinking residues for the final cover of a MSW landfill. *Dans* 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal, Vol. 1, p. 585-591.

Bussière, B., Aubertin, M. et Zhan, G. 2007; submitted. Design of inclined covers with capillary barrier effect. Discussion to Parent and Cabral (2006). Submitted to geotechnical and geological engineering.

Cabral, A. et Bérubé, L-P. 2006. Utilisation des résidus de désencrage pour augmenter efficacité de captage des biogaz (rapport d'étape). RDC#314427.

Cabral, A. R. 2006. Atténuation naturelle des GES émis par les sites d'enfouissement [en ligne]. Disponible sur: http://www.usherbrooke.ca/observatoire/evenements/doc/journee06_pdf/ cabral.pdf [consulté le 08/31 2007].

Cabral, A.R., Planchet, L., F.A., M. et Lefebvre, G. 2004. Determination of the soil water characteristic curve of highly compressible materials: Case study of pulp and paper by-product, Geotechnical Testing Journal, 27: 154-162.

Cabral, A.R., Racine, I., Burnotte, F. et Lefebvre, G. 2000. Diffusion of oxygen through a pulp and paper residue barrier, Canadian Geotechnical Journal, 37: 201-217.

Cabral, A.R., Burnotte, F., Lefebvre, G., Amyot, G. et Lacasse, G. 1999a. Design construction and monitoring of a waste rock cover using pulp and paper residues. *Dans* Tailings and Mine Waste '99, Fort Collins, p. 405-415.

Cabral, A.R., Lefebvre, G., Burnotte, F., Panarotto, C.T. et Pastore, E. 1999b. Use of pulp and paper residues as an alternative cover material to landfill and to acid generating tailings. *Dans* 2° Seminario de Meio Ambiente em Industrias de Processo, Sao Paulo, Brazil, p. 56-70.

Cabral, A.R., Lefebvre, G., Burnotte, F., Proulx, M.-., Racine, I. et Audet, C. 1998. Developments in the use of deinking residues in cover systems for acid generating mine tailings. *Dans* Tailing and Mine Waste '98, Fort Collins, CO, p. 379-388.

Castelan, J-S. 2007. Code MatLab pour le calcul des longueurs de transfert, selon Ross (1990). Code MatLab développé dans le cadre du cours de Géotechnique environnementale, GCI 733, Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke

Çelik, B., Rowe, R. K. et Ünlü, K. 2007. Effect of sandy vadose zone on the performance of landfill barrier systems Comptes rendu de la 11e conférence internationale Waste Management and Landfill Symposiums, Italie

Darcy, H. 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris, 647 p.

Davis Instrument. 2004. Ensemble de capteurs intégrés, Manuel d'installation, pour les stations météo Ventage Pro2 et Ventage Pro2 plus, version française, Californie, USA, 64 p.

Decagon Devices. 2005. Mini disk infiltrometer: User's manuals, version 1:3. Decagon Devices Inc, 20 p.

Decagon Devices. 2006. ECH_2O system: User's manual, for all ECH0 related sensors and loggers. Decagon Device Inc, 62 p.

El Ghabi, B. 2007. Étude des recouvrements avec effet de barrière capillaire pour minimiser les infiltrations d'eau dans les sites d'enfouissement de matières résiduelles. Maîtrise ès Science appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Fredlund, D.G. et Wilson, G.W. 2000. From theory to the practice of unsaturated soil mechanics. Cours intensif de la Société canadienne de géotechnique. Montréal, Québec, Canada.

Fredlund, M.D., Wilson, G.W. et Fredlund, D.G. 1997. Indirect procedures to determine unsaturated soil property functions, Proc. 50th Canadian Geot. Conference.

Fredlund, D.G. et Xing, A.Q. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, 31: 521-532.

Fredlund, M.D., Fredlund, D.G. et Wilson, G.W. 2000. An equation to represent grain-size distribution, Canadian Geotechnical Journal, 37: 817-827.

Fredlund, D. et Rahardjo, H. 1993. Soil mechanics for unsaturated soil. Wiley, New York, U.S.A.

Gardner, W. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporate from a water table. Soil science, 85: 228-232.

Google, 2008. Google Earth, version 4.3.7284.3916 (bêta), 8 juillet 2008, consulté le 13 août 2008

Gouvernement du Canada. 2002. Plan d'action 2000 sur le changement climatique. Environnement Canada et Ressources Naturelles Canada, 52 p.

Gouvernement du Québec. 2008. Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles, loi sur la qualité de l'environnement. Provinciale, Québec.

Holtz, R.D. et Kovacs,W.D.(Traduit par Jean Lafleur). 1991. Introduction à la géotechnique. Éditions ECOLE POLYTECHNIQUE, 808 p.

Humer, M. et Lechner, P. 1999. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills, Waste Management Research, 17: 443-452.

Hwang, S.I. et Powers, S. 2003. Using particle size distribution models to estimate soil hydraulic properties, Soil Sci. Amer. Proc., 67: 1103-1112.

INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), 2008, Scilab version 4.1.2, Paris, France

Irrometer CO. 2008. Optimizine irrigation worldwide, since 1951 [en ligne]. Available from http://www.irrometer.com/ [consulté le 03/26 2008].

Kamon, M., Inazumi, S., Takashi, T. et Inui, T. 2001. Waste sludge applicability and waste balance analysis of landfill cover system. *Dans* Proceedings of the First Korea-Japan Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering, Seoul, Korea, p. 31-38.

Kämpf, M. et Montenegro, H. 1997. On the performance of capillary barriers as landfill cover, Hydrology and Earth Systems Sciences, 4: 925-929.

Khire, M.V., Benson, C.H. et Bosscher, P.J. 2000. Capillary barriers: Design variables and water balance, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 126: 695-708.

Kisch, M. 1959. The theory of seepage from clay-blanketed reservoirs, Geotechnique, 9: 9-21.

Krahn, J. 2004. Seepage modeling with SEEP/W an engineering methodology. Première édition, GEO-SLOPE International, Ltd, mai 2004, 398 p.

Lacroix Vachon, B., El-Ghabi, B. et Cabral, A.R. 2007. Évaluation préliminaire de l'efficacité du recouvrement avec double effet de barrière capillaire installé au site de St-Tite-des-Caps, Qc. Comptes rendus de la 60e conférence de la société canadienne de géotechnique, Ottawa.

Leong, E.C. et Rahardjo, H. 1997. Permeability functions for unsaturated soils, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 123: 1118-1126.

Marinho, F.A.M. 1994, Shrinkage behaviour of some plastic soils. Ph.D. Thesis. Imperial College, London, 215 pages.

McCartney, J.S. 2007. Determination of the hydraulic characteristics of unsaturated soils using a centrifuge permeameter. Ph.D. Thesis, Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin, Texas.

Miller, C.J., Yesiller, N., Yaldo, K. et Merayyan, S. 2002. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128: 733-742.

Moo-Young, H.K. et Zimmie, T.F. 1996. Geotechnical properties of paper mill sludges for use in landfill covers, Journal of Geotechnical Engineering, 122: 768-775.

Morel-Seytoux, H.J. et Khanji, J. 1974. Derivation of an equation of infiltration, Water Resources Research, 10: 795-800.

Morel-Seytoux, H.J. 1994. Steady-state effectiveness of a capillary barrier on a sloping interface. 14th Hydrology days, Hubert J. Morel-Seytoux (ed), Hydrology Days Publications, Atherton, CA, 335-346.

Morel-Seytoux, H.J., Meyer, P.D., Nachabe, S.D., Touma, J., van Genuchten, M.T. et Lanhard, R.J. 1996. Parameter equivalence for the brooks-corey and van Genuchten soil characteristics: Preserving the effective capillary drive. water resources research, 10: 1251-1258.

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resources Research, 12: 513-522.

Municipalité de Saint-Tite-des-Caps. Carte, pour bien vous situer [en ligne].Disponible sur : http://www.sainttitedescaps.com/index.html [site consulté le 03/26 2008].

Ngnepieba, P., Le Dimet, F.X., Boukong, A. et Nguetseng, G. 2002. Identification de paramètres, une application de l'équation de Richards, Revue africaine de la recherche en informatique et mathématique appliquée, 1: 157.

Nyhan J. W., Schofield T. G. et Starmer R. H. 1997. A water balance study of four landfill cover desings varying in slope for semiarid regions, Journal of Environmental Quality, 26: 1385-1392.

Olson, R.E. et Langfelder, L.J. 1965. Pore water pressures in unsaturated soils, Jour. of the Soil Mech. and Found. Div. ASCE, 91(SM4): 127-151.

Panarotto, C.T., Cabral, A.R. et Lefebvre, G. 2005. Biochemical evolution of a cellulose-rich by-product used as alternative cover material. part I: Laboratory study. J. Env. Engin. and Science, 4: 123-138.

Panarotto, C.T., Robart, G., Cabral, A., Chartier, R., Burnotte, F. et Lefebvre, G. 1999. Using deinking residues in cover systems. *Dans* 7th Int. Waste Mgmt and Landfill Symposium - SARDINIA 99, 4 - 8 octobre, S. Margherita di Pula, Italy, Vol. III, p. 357-364.

Parent, S.E. 2003. Étude des couvertures avec effet de barrière capillaire: Applications à l'utilisation des résidus de désencrage comme matériau de recouvrement de sites de résidus miniers et d'enfouissement sanitaire. Maîtrise en science appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Parent, S.E., Cabral, A. et Zornberg, J.G. 2007. Water retention curves and hydraulic conductivity functions of highly compressible materials, Canadian Geotechnical Journal : accepted.

Parent, S.E. et Cabral, A. 2006a. Design of inclined covers with capillary barrier effect, Geotechnical and Geological Engineering Journal, 24: 689-710.

Parent, S.E. et Cabral, A. 2006b. Design and installation of zero-tension lysimeters in an inclined cover. Unsaturated Soil Conference, Carefree, Arizona.

Parent, S.E. 2006. Aspects hydrauliques et géotechniques de la conception de barrières capillaires incluant des matériaux recyclés hautement compressibles. Ph.D., Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Parent, S.E., El Ghabi, B., Motte, J., Lacroix Vachon, B., Peinturier, C. et Askri, M., 2006. Cellule expérimentale de Saint-Tite-des-Caps, rapport interne, stdc_v01.2.1, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 40 p.

PC-Progress, 2003. Neural Network Prediction, Rosetta Lite v 1.1, Czech Republic

Pease, R.E. et Stormont, J.C. 1996. Increasing the divergence capacity of capillary barriers Albuquerque, Nouveau-Mexique.

Planchet, L. 2001. Utilisation des résidus de désencrage comme barrière capillaire et évapotranspirative (ET) pour les parcs à résidus miniers producteurs de DMA. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Poulovassilis, A. 1962. Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains, Soil Science, 93: 405-412.

Québec MUNICIPAL. 19 mars 2008. En manchette Sherbrooke - soixante-quatorze pour cent des émissions de GES de la ville proviennent du méthane non brûlé de son lieu d'enfouissement sanitaire.[en ligne]. Disponible sur: http://www.quebecmunicipal.qc.ca/Cyberbulletin/manchette.asp?article=%2016765 [site consulté le 03 2008].

Recyc-Québec. 2006. *Bilan 2004 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. 177 p.

Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquides through porous mediums, J. Phys., 1: 318-333.

Robart, G. 1998. Étude de la perméabilité de la compressibilité des résidus de désencrage. Maîtrise en science appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Ross, B. 1990. Diversion capacity of capillary barriers, Water Resources Research, 26: 2625-2629.

Serrano, S.E. 2004. Modeling infiltration with approximate solution to Richards équation, Journal of Hydrologic engineering, sep.-oct.

Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th. et Šejna, M. 2006. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, technical manual. PC Progress, Prague, République Czech.

Smith, K.A. et Mullins, C.E. 2001. Soil and environmental analysis : Physical methods. Marcel Dekker Seconde Édition, New York.

Terzaghi, K., Peck, R.B. et Mesri, G. 1967. Soil mechanics in engineering practice. New York.

The MathWorks, Inc, 2002, MatLab, The Language of Technical Computing, version 7.5.0(R2007b), MA, USA

Tinjum, J.M., Benson, C.H. et Blotz, L.R. 1997. Soil-water characteristic curves for compacted clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123: 1060-1069.

Topp, G.C. et Miller, E.E. 1966. Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 30: 156-162.

United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1999. UNsaturated SOil hydraulic properties DAtabase (UNSODA), version 2.0, California.

USEPA. 2002. Solid waste management and greenhouse gases: A life-cycle assessment of emissions and sinks, 2ième édition. United States Environmetal Protection Agency. 136 p.

USM GmbH. 2001. User's manual T4, pressure transducter tensiometer with external refilling. .USM GmbH, München, 36 p.

van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.

Walter, M.T., Kim, J.S., Steenhuis, T.S., Parlange, J.Y., Heilig, A., Braddock, R.D., Selker, J.S. et Boll, J. 2000. Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil: Laboratory investigation, Water Resources Research, 36: 841-849.

Webb, S. 1997, Generalization of Ross tilted capillary barrier diversion formula for different two-phase characteristic curves, Water Resources Research, 33, 1855–1859.

Wendroth, O., Ehlers, W., Hopmans, J., Kage, H., Halbertsma, J. et Wosten, J. 1993. Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils. Soil Sc. Soc. Am. J. 57, 1436-1443.

WHI. 2000. WHI UnSat suite plus user's manual. Waterloo, Ontario, Canada.

Wilson, G.W., Fredlund, D.G. et Barbour, S.L. 1997. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces, Canadian Geotechnical Journal, 34: 145-155.

ANNEXES

A. CÔNE DE SABLE EFFECTUÉ SUR LE TERRAIN

Tableau A-1 - Cônes de sable effectués sur le SPD, hors cellule, en 2006

		SPD près du pylône, compacté 2004-05-06	SPD près du pylône, compacté sur la pente non recouverte 2006-06-24	SPD près du pylône, compacté sur la pente recouverte de sol (silt) 2006-07-20
1	Masse initiale du flacon de sable	6395 g	6592,8 g	5634,8 g
2	Masse finale du flacon de sable	2845 g	3392,9 g	2561,8 g
3	Masse du sable dans le trou + le cône	3550 g	3199,9 g	3073 g
4	Masse du sable dans le cône	1715 g	1757,2 g	1742,6 g
5	Masse du sable dans le trou	1835 g	1442,7 g	1330,4 g
6	Masse volumique du sable étalonné	1563,6 kg/m³	1444,4 kg/m³	1586,6 kg/m³
7	Volume du trou	0,00117 m³	0,00100 m³	0,000839 m³
8	Masse du sol humide (et cailloux) + récipient	1190 g	1796,5 g	1703,2 g
9	Masse du récipient	22,4 g	674,2 g	674,4 g
10	Masse du sol humide (et cailloux)	1168 g	1122 g	1028,8 g
11	Masse du sol humide (passant 5 mm)	1168 g	1122 g	1028,8 g
12	*Masse des cailloux humides*	--- g	0 g	0 g
13	Teneur en eau du sol (passant 5 mm)	113 %	116,9 %	137,82 %
14	Teneur en eau des cailloux	--- %	--- %	--- %
15	Masse du sol sec (passant 5 mm)	548 g	517 g	432,6 g
16	Masse des cailloux secs	--- g	--- g	--- g
17	Masse du sol sec + cailloux secs	--- g	--- g	--- g
18	Teneur en cailloux totale	--- %	--- %	--- %
19	ρ_d totale in situ	467 kg/m³	518 kg/m³	516 kg/m³

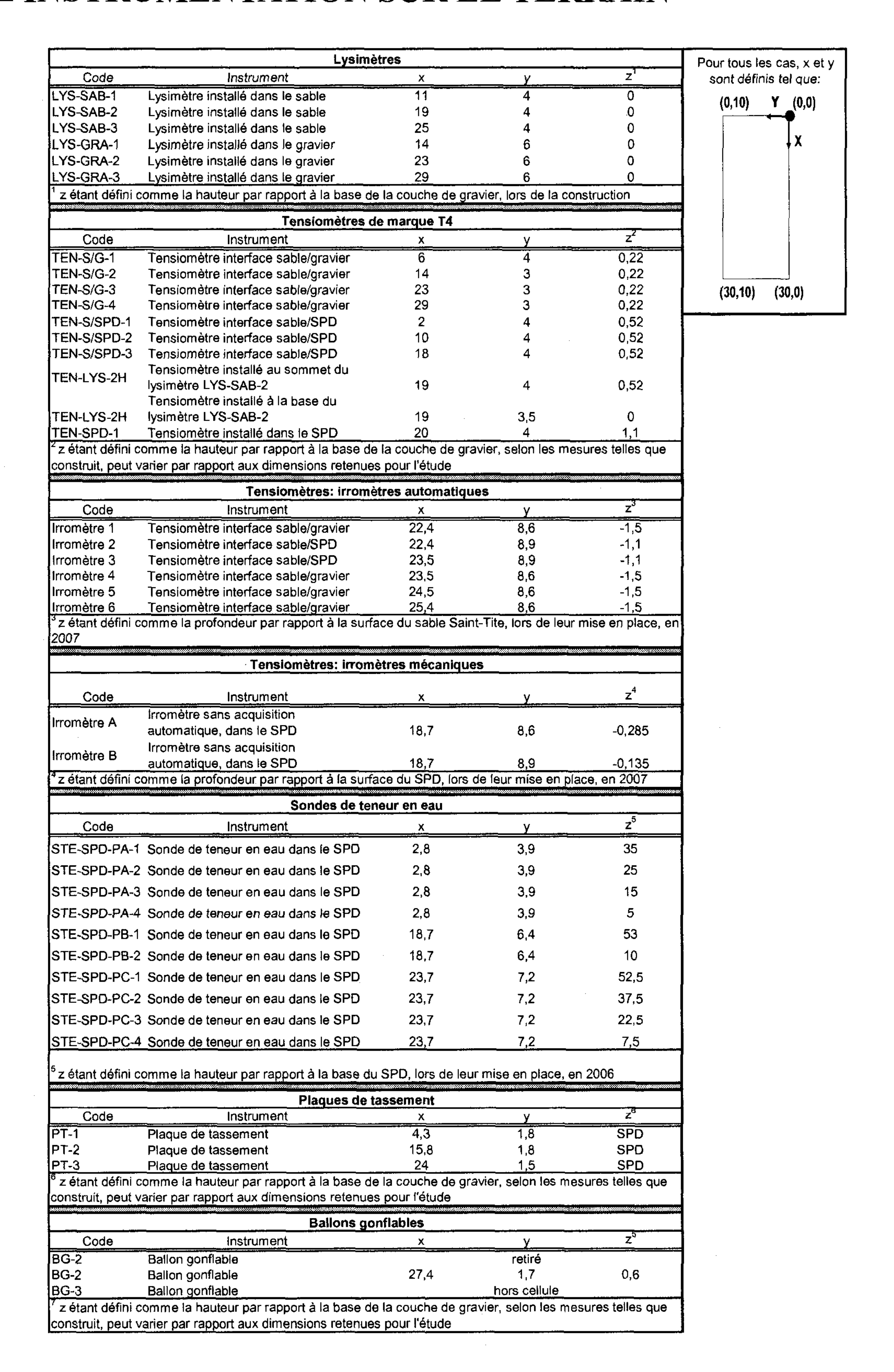
Tableau A-2 - Cônes de sables effectués sur le SPD, dans la cellule expérimentale, lors de la construction

Coordonnées X,Y,Z	Date	Densité sèche (kg/m³)
(13,10; 7,85, 0,37)	28/07/2005	633,31
(23,50; 8,10)	28/07/2005	598,27
(30;0;?)	14/09/2005	609,94

Tableau A-3 - Cônes de sable effectués sur le SPD, hors cellule, dans le trou du ballon gonflable n°3, lors de la mise en place de ce dernier en 2007

		Cône n° 1	Cône n° 2
1	Masse initiale du flacon de sable	7040 g	7130 g
2	Masse finale du flacon de sable	2810.0 g	3195.0 g
3	Masse du sable dans le trou + le cône	4230.0 g	3935 g
4	Masse du sable dans le cône	1704.8 g	1704.8 g
5	Masse du sable dans le trou	2525.2 g	2230.2 g
6	Masse volumique du sable étalonné	1563 kg/m³	1563 kg/m³
7	Volume du trou	0.00162 m³	0.00143 m³
8	Masse du sol humide (et cailloux) + récipient	2045 g	1850 g
9	Masse du récipient	20 g	20 g
10	Masse du sol humide (et cailloux)	2025 g	1830 g
11	*Masse du sol humide (passant 5 mm)*	*2025 g*	*1830 g*
12	Masse des cailloux humides	0 g	0 g
13	Teneur en eau du sol (passant 5 mm)	102.1 %	103.8 %
14	Teneur en eau des cailloux	--- %	--- %
15	*Masse du sol sec (passant 5 mm)*	*1002 g*	*897.9 g*
16	Masse des cailloux secs	--- g	--- g
17	Masse du sol sec + cailloux secs	--- g	--- g
18	Teneur en cailloux totale	--- %	--- %
19	ρ_d totale in situ	620 kg/m³	629 kg/m³

B. SOMMAIRE DE LA POSITION ET DU CODE DE L'INSTRUMENTATION SUR LE TERRAIN



Lysimètres

Code	Instrument	x	y	z[1]
LYS-SAB-1	Lysimètre installé dans le sable	11	4	0
LYS-SAB-2	Lysimètre installé dans le sable	19	4	0
LYS-SAB-3	Lysimètre installé dans le sable	25	4	0
LYS-GRA-1	Lysimètre installé dans le gravier	14	6	0
LYS-GRA-2	Lysimètre installé dans le gravier	23	6	0
LYS-GRA-3	Lysimètre installé dans le gravier	29	6	0

[1] z étant défini comme la hauteur par rapport à la base de la couche de gravier, lors de la construction

Tensiomètres de marque T4

Code	Instrument	x	y	z[2]
TEN-S/G-1	Tensiomètre interface sable/gravier	6	4	0,22
TEN-S/G-2	Tensiomètre interface sable/gravier	14	3	0,22
TEN-S/G-3	Tensiomètre interface sable/gravier	23	3	0,22
TEN-S/G-4	Tensiomètre interface sable/gravier	29	3	0,22
TEN-S/SPD-1	Tensiomètre interface sable/SPD	2	4	0,52
TEN-S/SPD-2	Tensiomètre interface sable/SPD	10	4	0,52
TEN-S/SPD-3	Tensiomètre interface sable/SPD	18	4	0,52
TEN-LYS-2H	Tensiomètre installé au sommet du lysimètre LYS-SAB-2	19	4	0,52
TEN-LYS-2H	Tensiomètre installé à la base du lysimètre LYS-SAB-2	19	3,5	0
TEN-SPD-1	Tensiomètre installé dans le SPD	20	4	1,1

[2] z étant défini comme la hauteur par rapport à la base de la couche de gravier, selon les mesures telles que construit, peut varier par rapport aux dimensions retenues pour l'étude

Tensiomètres: irromètres automatiques

Code	Instrument	x	y	z[3]
Irromètre 1	Tensiomètre interface sable/gravier	22,4	8,6	-1,5
Irromètre 2	Tensiomètre interface sable/SPD	22,4	8,9	-1,1
Irromètre 3	Tensiomètre interface sable/SPD	23,5	8,9	-1,1
Irromètre 4	Tensiomètre interface sable/gravier	23,5	8,6	-1,5
Irromètre 5	Tensiomètre interface sable/gravier	24,5	8,6	-1,5
Irromètre 6	Tensiomètre interface sable/gravier	25,4	8,6	-1,5

[3] z étant défini comme la profondeur par rapport à la surface du sable Saint-Tite, lors de leur mise en place, en 2007

Tensiomètres: irromètres mécaniques

Code	Instrument	x	y	z[4]
Irromètre A	Irromètre sans acquisition automatique, dans le SPD	18,7	8,6	-0,285
Irromètre B	Irromètre sans acquisition automatique, dans le SPD	18,7	8,9	-0,135

[4] z étant défini comme la profondeur par rapport à la surface du SPD, lors de leur mise en place, en 2007

Sondes de teneur en eau

Code	Instrument	x	y	z[5]
STE-SPD-PA-1	Sonde de teneur en eau dans le SPD	2,8	3,9	35
STE-SPD-PA-2	Sonde de teneur en eau dans le SPD	2,8	3,9	25
STE-SPD-PA-3	Sonde de teneur en eau dans le SPD	2,8	3,9	15
STE-SPD-PA-4	Sonde de teneur en eau dans le SPD	2,8	3,9	5
STE-SPD-PB-1	Sonde de teneur en eau dans le SPD	18,7	6,4	53
STE-SPD-PB-2	Sonde de teneur en eau dans le SPD	18,7	6,4	10
STE-SPD-PC-1	Sonde de teneur en eau dans le SPD	23,7	7,2	52,5
STE-SPD-PC-2	Sonde de teneur en eau dans le SPD	23,7	7,2	37,5
STE-SPD-PC-3	Sonde de teneur en eau dans le SPD	23,7	7,2	22,5
STE-SPD-PC-4	Sonde de teneur en eau dans le SPD	23,7	7,2	7,5

[5] z étant défini comme la hauteur par rapport à la base du SPD, lors de leur mise en place, en 2006

Plaques de tassement

Code	Instrument	x	y	z[6]
PT-1	Plaque de tassement	4,3	1,8	SPD
PT-2	Plaque de tassement	15,8	1,8	SPD
PT-3	Plaque de tassement	24	1,5	SPD

[6] z étant défini comme la hauteur par rapport à la base de la couche de gravier, selon les mesures telles que construit, peut varier par rapport aux dimensions retenues pour l'étude

Ballons gonflables

Code	Instrument	x	y	z[5]
BG-2	Ballon gonflable		retiré	
BG-2	Ballon gonflable	27,4	1,7	0,6
BG-3	Ballon gonflable		hors cellule	

[7] z étant défini comme la hauteur par rapport à la base de la couche de gravier, selon les mesures telles que construit, peut varier par rapport aux dimensions retenues pour l'étude

C. CARACTÉRISTIQUES DES ÉQUIPEMENTS DE TERRAIN

Nom utilisé dans ce mémoire	Nom donné par le fabricant	Récolte des données	Intervalle de mesure	Précision	Champs d'application	Notes
Sonde ECH_2O	Sonde de teneur de en eau ECH_2O	Acquisiteur: EM-50	Selon la courbe de calibration kPa (mV)	± 1mV	État de la teneur en eau dans la couche, calcul à rebours de k(φ).	Besoin d'une courbe de calibration propre à chaque matériau.
Infiltromètre de type mini disque	Infiltromètre de type Mini Disque	Mesures directes	De 0,5 à 6 cm de succion	Variable, selon les conditions	Détermination de k_{sat}. Utilisée pour les SPD dans le cadre de ce mémoire.	Il faut creuser jusqu'à la profondeur souhaitée afin d'effectuer des tests. Le trou doit permettre à une personne d'y entrer.
Tensiomètre de type UMS model T4	Tensiomètre de type UMS model T4	Acquisiteur: DL6	-100 kPa à + 100 kPa	< ± 0,1%	Détermination de la succion le long du recouvrement et dans les différentes couches.	Besoin de convertir les données collectées par le DL6 en (mV) en succion (kPa).
Irromètre automatique	Irrometer RSU	Acquisiteur: Watermark	Entre 0 et 32 kPa	± 0,25 kPa	Détermination de la succion le long du recouvrement et dans les différentes couches.	Lecture en kPa directe.
Irromètre mécanique	Irrometer R	Mesures directes	Entre 0 et 100 kPa	± 3 kPa pour 0 à 6 kPa, ± 1kPa pour ψ 6 kPa	Détermination de la succion dans la couche des SPD.	Données ponctuelles. Lecteur offre lectures sur gamme trop étendue pour les besoins.
Lysimètre	---	Mesures directes	Entre 0 et 20 L	± 10 mL	Détermination du débit d'infiltration.	Permet de quantifier les infiltrations dans les couches de la barrière capillaire.
Plaque de tassement	---	Mesures directes	0 à 60 cm	± 1 cm	Détermination du tassement des SPD, variation des propriétés hydrauliques du SPD.	Données ponctuelles.
Station météo Weatherlink	Station météo Weatherlink	Sur la console	Variable selon le paramètre	Variable selon le paramètre	Détermination du bilan hydrique du site et valeurs à utiliser pour modélisation.	---

D. CONVERSION DE SUCCIONS MESURÉES À L'AIDE DES DL6 EN KPA.

Selon les concepteurs (Manuel technique, 2001) la fonction reliant les mesures en mV à la pression en kPa est variable selon les modèles des T4 choisis ainsi que l'angle de positionnement de ces tensiomètres. L'équation reliant les mesures brutes aux mesures de pression en kPa s'est révélée non exacte, après avoir analysé certaines mesures sur le terrain. Ainsi, une calibration a été réalisée en comparant les mesures lues par un appareil manuel portatif appelé Infeild (en hPa) avec les mesures des DL6 (mv), voir le tableau A.3-1. Deux régressions ont été effectuées (voir la figure A.3-1), une ayant comme contrainte le point (0 mv, 0 kPa) et l'autre, sans contrainte. La correspondance retenue est la suivante : ***Succion (kPa) = lecture brute (mv)/10***

Tableau A-4 - Lecture avec Infeild et DL6, le 27 juin 2007

Tensiomètre	Infeild			Lecture DL6	
	heure de la lecture	hPa	kPa	heure de la lecture	mv
TEN-S/G-4	13:58	15	1,5	13:00	19
TEN-LYS-2B	13:42	-10	-1	16:00	-9,4
TEN-S/SPD-3	13:56	53	5,3	14:00	52,3
TEN-SPD-1	13:46	147	14,7	13:00	139,8
TEN-LYS-2H	13:52	41	4,1	14:00	41,4
TEN-S/G-3	13:48	36	3,6	14:00	34,7
TEN-S/SPD-1	13:35	43	4,3	14:00	43
TEN-S/G-1	13:34	70	7	14:00	68,9
TEN-S/G-2	13:37	38	3,8	14:00	41,7
TEN-S/SPD-2	13:32	59	5,9	10:00	57,7

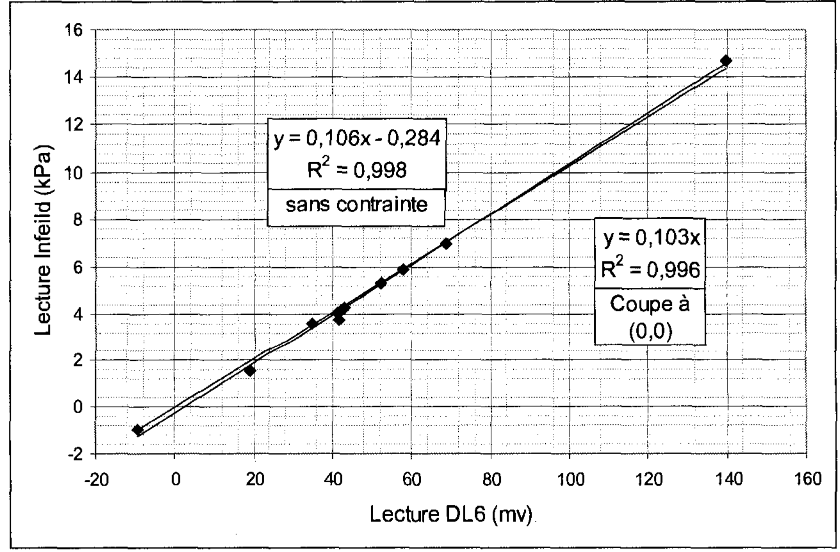


Figure A-1 Lecture avec Infeild et DL6, le 27 juin 2007

E. CORRECTION DE LA CALIBRATION DE L'IRROMÈTRE AUTOMATIQUE NO 4

La conversion entre les valeurs brutes (en mV) et les succions (kPa) se fait automatiquement par les Watermark pour les Irromètres automatiques. Par contre, des essais en laboratoire ont montré par contre que pour un des Irromètres automatiques, cette calibration était défectueuse.

L'Irromètre automatique n°4 a été inséré dans un grand cylindre gradué. En faisant varier la hauteur de la nappe d'eau dans le cylindre, on faisait varier la hauteur de la tête d'eau (succion) appliquée sous le transducteur. En mesurant la distance entre la jauge et la nappe d'eau, il était possible d'évaluer la succion sollicitée, en m et en kPa. Ces succions ont pu être comparées.

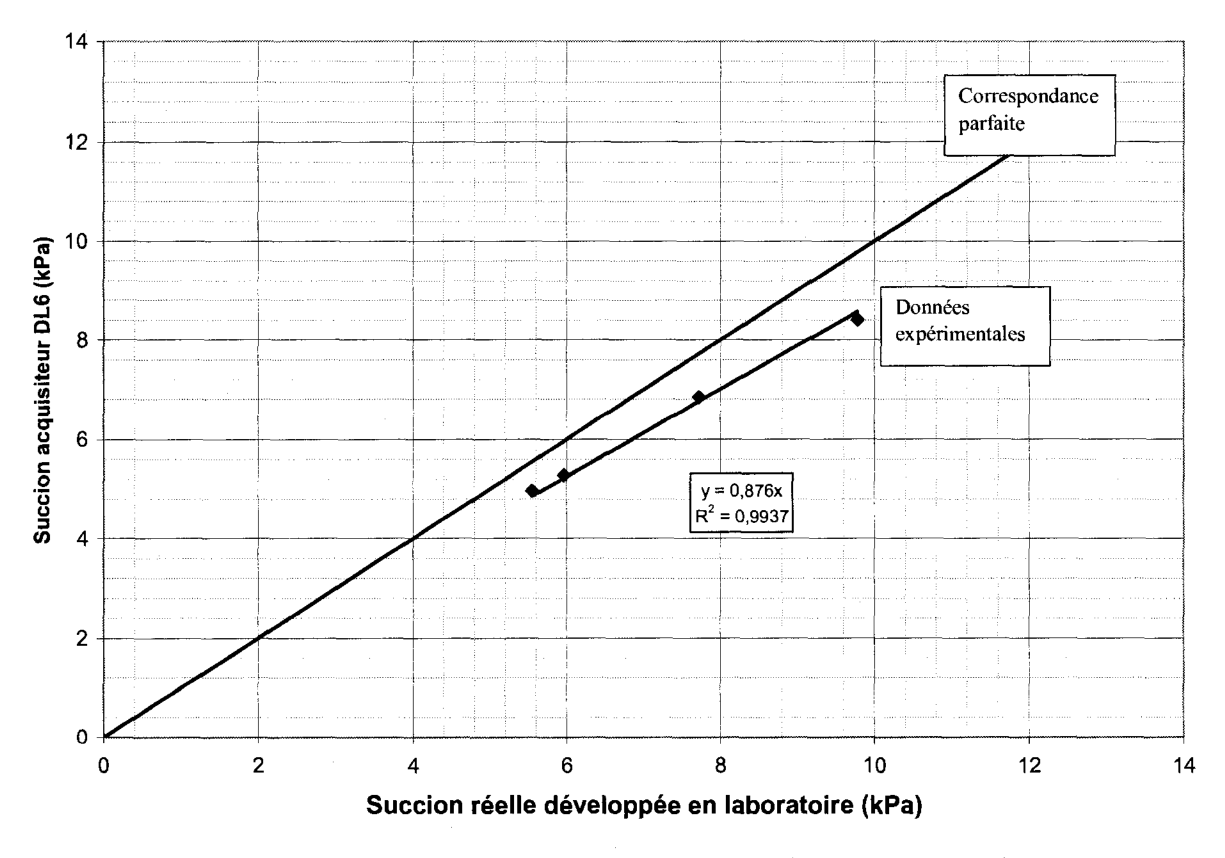
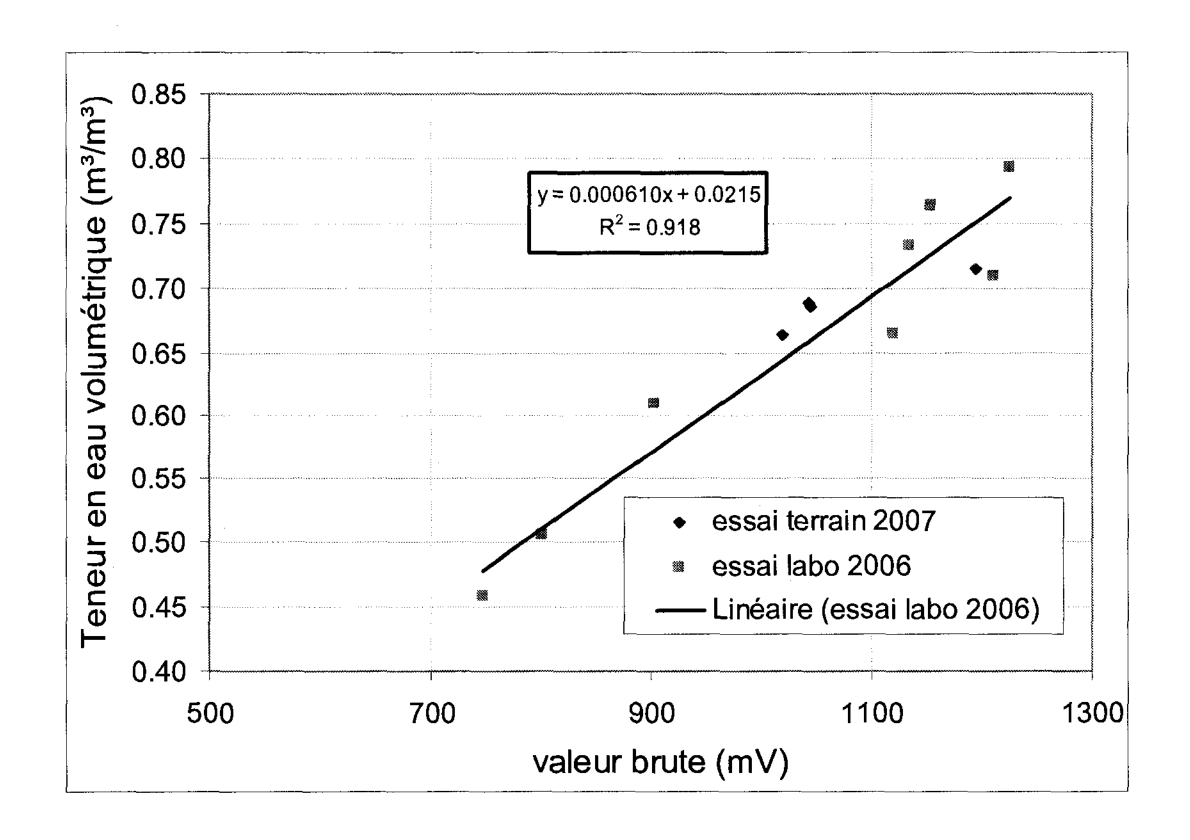
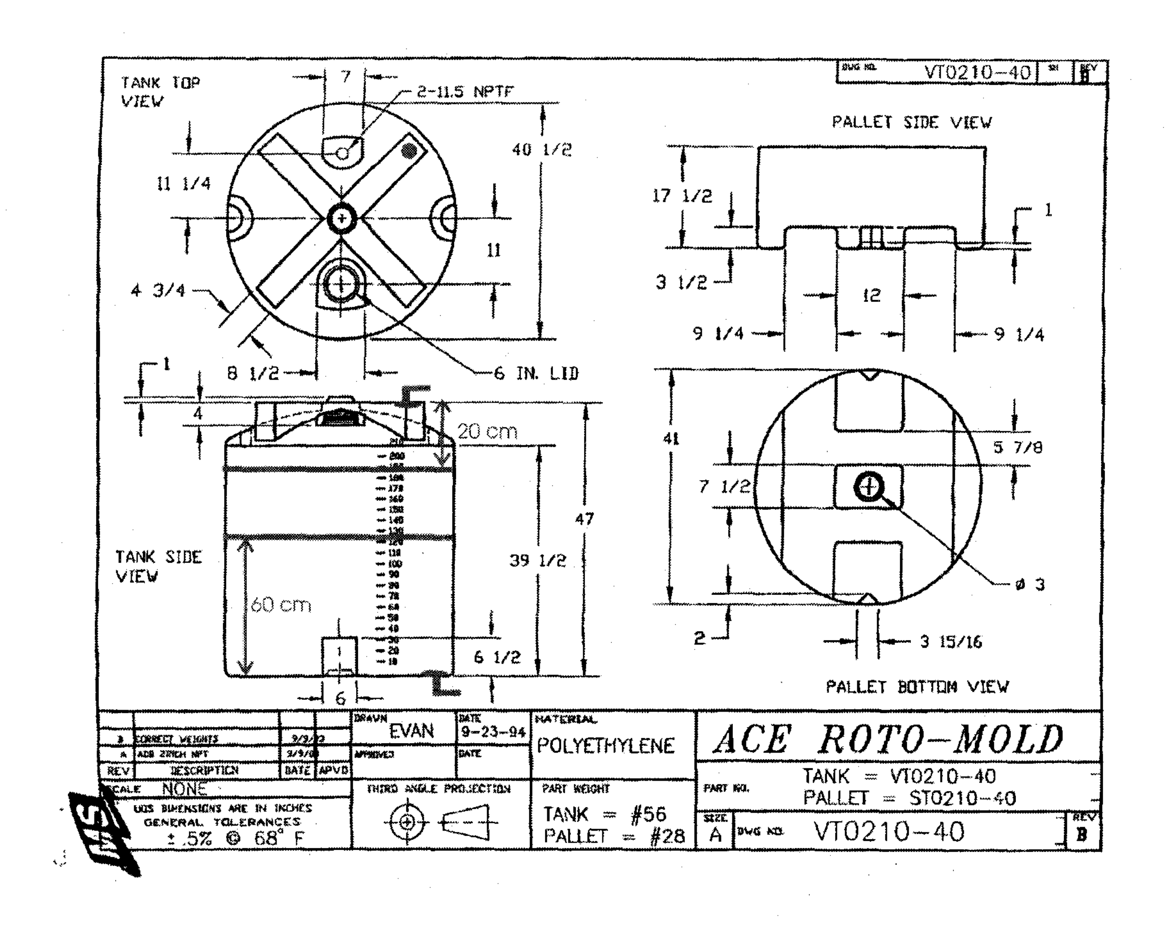


Figure A-2 Correction de la calibration - Lecture avec Infeild et DL6, le 27 juin 2007

F. CALIBRATION DES SONDES DE TENEUR EN EAU ECH20, POUR LE SPD



G. FICHES TECHNIQUES DES LYSIMÈTRES INSTALLÉS DANS LE RECOUVREMENT ALTERNATIF



H. MODE OPÉRATOIRE POUR LES ESSAIS COLONNE

1) Préparer le sol à tester à la bonne teneur en eau, soit :
   Pour le gravier : la teneur en eau de mise en place lors de la construction : 3,4%
   Pour le sable : la teneur en eau associée à la densité de mise en place (courbe Proctor) : 5%
2) Fermer la valve à la base de la colonne après avoir rempli le siphon d'eau.
3) Mettre en place le sol dans la colonne selon la densité de mise en place sur le terrain, soit :
   1650 kg/m^3 pour le sable et
   1900 kg/m^3 pour le gravier
4) Les 4 premiers moules sont remplis en réalisant 4 couches de 2,5 cm chacune. L'épaisseur des couches est vérifiée par une tige préalablement calibrée aux bonnes épaisseurs.
5) Les 6 derniers moules sont remplis en réalisant 2 couches de 5 cm chacune. L'épaisseur des couches est vérifiée par une tige préalablement calibrée aux bonnes épaisseurs.
6) La valve à la base est ouverte, de l'eau est ajoutée au sommet de la colonne jusqu'à l'observation d'une perte d'eau à la valve en bas.
7) Faire écouler l'eau pendant environ 15 minutes. Fermer par la suite la valve et ajouter une bonne quantité d'eau au sommet de la colonne (dans l'entonnoir).
8) Au moins 12 heures plus tard, vérifier que le niveau d'eau se situe encore au-dessus du sol et qu'il est stable.
9) Rouvrir la valve pour la période de stabilisation (drainage) pour 2 ou 3 jours.
   Note : 2 essais ont été réalisés sur le même type de sol (sable) et la période de stabilisation (2 ou 3 h) n'influence pas significativement les réponses.
10) Démonter la colonne en commençant par le moule le plus élevé.
11) Pour les 6 premiers moules, prendre une mesure de teneur en eau par moule (faire sécher à l'étuve au moins 24 h).
12) Pour les 2 moules suivants (entre 20 et 40 cm) prendre 2 mesures de teneur en eau par moule (faire sécher à l'étuve au moins 24 h).
13) Pour les 2 moules qui sont à la base de la colonne (entre 0 et 20 cm), prendre 4 mesures de teneur en eau par moule (faire sécher à l'étuve au moins 24 h).

I. MODE OPÉRATOIRE POUR LES ESSAIS TABLE DE SUCCION

1) Remplir la table de tension d'eau, vérifier qu'il n'y a pas de bulles d'air dans le tuyau reliant la table de tension et la burette puis verser les billes de verre bien nettoyées.
2) Prendre une teneur en eau initiale de l'échantillon (sable, gravier) à tester.
3) À partir de la teneur en eau initiale, déterminer la quantité d'eau à ajouter pour chaque échantillon pour compacter l'échantillon à une densité proche de celle du terrain selon les courbes Proctors (1900 kg/m^3 pour le gravier et 1650 kg/m^3 pour le sable). Préparer l'échantillon avec cette teneur en eau.
4) Identifier et mesurer les moules allant recevoir les échantillons (détermination de la masse, du volume et les numéroter).
5) Remplir les moules (d'un ordre aléatoire) avec le sol à tester avec la masse nécessaire pour atteindre la densité souhaitée. Compacter jusqu'à atteindre la hauteur voulue. La hauteur est mesurée avec un LVDT mécanique. 1 cm a été retenu comme hauteur pour les essais sur le sable classe A et 2 cm ont été retenus pour les essais sur le gravier.
6) Peser chaque échantillon et noter la hauteur du sol. Calculer les densités sèches.
7) Mettre les échantillons sur un tissu filtre et refermer le tissu en forme de baluchon pour faciliter les manipulations.
8) Insérer tous les échantillons sur la pierre poreuse (billes de verre). S'assurer qu'il y a un bon contact avec les billes de verres. La position des échantillons est déterminée de façon aléatoire.
9) Amener les échantillons *près de la saturation* en ajoutant, par le sommet des moules en ajoutant environ 20 ml d'eau à chaque échantillon.
10) Bien isoler le sommet de la table de tension par une pellicule de plastique.
11) Appliquer une première succion sur l'échantillon en abaissant le niveau d'eau dans la burette.
12) Attendre en moyenne entre un à deux jours, dépendamment du type de sol et de la hauteur du cylindre.
13) Le système étant équilibré, sortir l'échantillon n° 1 et le peser.
14) Répéter pour plusieurs autres tensions (exemple -10cm, -30 cm, -50 cm,-90 cm, -120 cm…).
15) A la fin de chaque prise de mesure, sécher les échantillons (n° 2 jusqu'au dernier) à l'étuve.
16) Déterminer la teneur en eau massique pour chacune des succions.
17) Convertir cette teneur en eau massique en teneur en eau volumétrique à l'aide des densités sèches de chacun des échantillons (étape 6).
18) Associer les teneurs en eau volumétrique avec les succions pour obtenir la CRE.

Note : Lors des essais dans le cadre de ce présent mémoire, du matériau de la pierre poreuse suivait les échantillons lors de la pesée masses humides et sèches. Les manipulations nécessaires ont été réalisées pour corriger l'erreur que la masse de la pierre poreuse entraîne.

J. CARACTÉRISATION DE LA PIERRE POREUSE, UTILISÉE DANS L'ESSAI TABLE DE SUCCION

A-Series Technical Quality Products



P.O. Box 840
Valley Forge, PA 19482-0840 USA
Telephone: (610) 651-4700
Fax: (610) 408-9724
Web site: www.pottersbeads.com

A-SERIES TECHNICAL QUALITY SOLID GLASS SPHERES

TYPICAL PROPERTIES

PHYSICAL

Density g/cc	2.50
Weight Pounds Per Gallon	13.3
Weight, Pounds Per Liter	3.70
Refractive Index	1.51 - 1.52
Crush Resistance psi	14,000 - 36,000
Hardness, MOH	5 - 6
Hardness, Knoop 100g load	515 Kg/mm²
Coefficient of Friction, Static	0.9 - 1.0

CHEMICAL

Composition	Soda-Lime Silica Glass
Free Silica	None

APPLICATIONS

- Pigment Deagglomeration for coatings and inks
- Mineral Processing
- Magnetic Tape
- Paper/Textile Coatings
- Mechanical Plating
- Pharmaceuticals
- Agriculture Products
- Cosmetics
- Dye Stuffs
- Chromatography
- Fillers and Extenders
- Fluidized Beds
- Optical Frame Molding
- Polishing/Vibratory Media
- Decorative
- Instrument Calibration
- Heat Transfer
- Filtration

Stock Number	Size (mm)	U.S. Sieve	% Round
Premium 5MM	4.7-5.3	N/A	90
Premium 4MM	3.7-4.3	N/A	90
Premium 3MM	2.8-3.2	N/A	90
Premium 2MM	1.8-2.2	N/A	90
Premium 1.5MM	1.3-1.7	N/A	90
A-205	1.7-2.3	8-12	80
A-170	1.4-2.0	10-14	80
A-130	1.2-1.7	12-16	80
A-120	1.0-1.4	14-18	80
A-100	0.8-1.2	16-20	80
P-0337	0.60-0.85	20-30	80
P-0280	0.71-0.50	25-35	80
P-0230	0.43-0.60	30-40	80
P-0170	0.30-0.43	40-50	90
P-0140	0.25-0.35	45-60	90
P-0120	0.21-0.30	50-70	90
P-0100	0.18-0.25	60-80	90
P-0080	0.15-0.21	70-100	90
P-0070	0.12-0.18	80-120	90
P-0060	0.10-0.15	100-140	90
P-0040	0.10-Finer	140-Finer	90

01/19/2007

K. CODE SCILAB POUR ARYA PARIS (1999)

```
// Display mode
mode(0);

// Display warning for floating point exception
ieee(1);

clear
clc

nombre_points = 30;

// propriétés et compaction du sol------------------------------------

rho_s = 2.65;// densité des grains (g/cm³)
rho_b = 2;// densité du matériau (bulk) (g/cm³)
indice_des_vides = (rho_s-rho_b)/rho_b;// [2] indice des vides du matériau
porosite = indice_des_vides/(1+indice_des_vides);// porosité

// définition des paramètres de Fredlund 2000------------------------

a = 1.6;// cm
n = 12;
m = 10;
drgr = 300;// cm
dm = 0.00001;// cm

diametre = logspace(-3,3,nombre_points);
passant = (1 ./(log(mtlb_a(exp(1),(a ./mtlb_double(diametre)) .^n)) .^m)) .*mtlb_s(1,(log(mtlb_a(1,drgr
./mtlb_double(diametre))) ./log(1+drgr ./dm)) .^7);
for i = 1:nombre_points //fraction massique versus diamètre
 if i==1 then
  masse(1,i) = passant(i);
  diametre_moyen(1,i) = matrix(mtlb_double(mtlb_e(diametre,i)) ./2,1,-1);
 else
  masse(1,i) = passant(i)-passant(i-1);
  diametre_moyen(1,i) = matrix(mtlb_a(mtlb_double(mtlb_e(diametre,i)),mtlb_double(mtlb_e(diametre,i-1)))
./2,1,-1);
 end;
end;
rayon_part = diametre_moyen ./2;

// arya et al. 1999

for i = 1:nombre_points //[3] teneur en eau
 if i==1 then
  teneur_en_eau(1,i) = porosite*masse(i);
  masse_cumul(1,i) = masse(i);
 else
  masse_cumul(1,i) = masse(i)+masse_cumul(i-1);
  teneur_en_eau(1,i) = porosite*masse_cumul(i);
```

```
 end;
end;

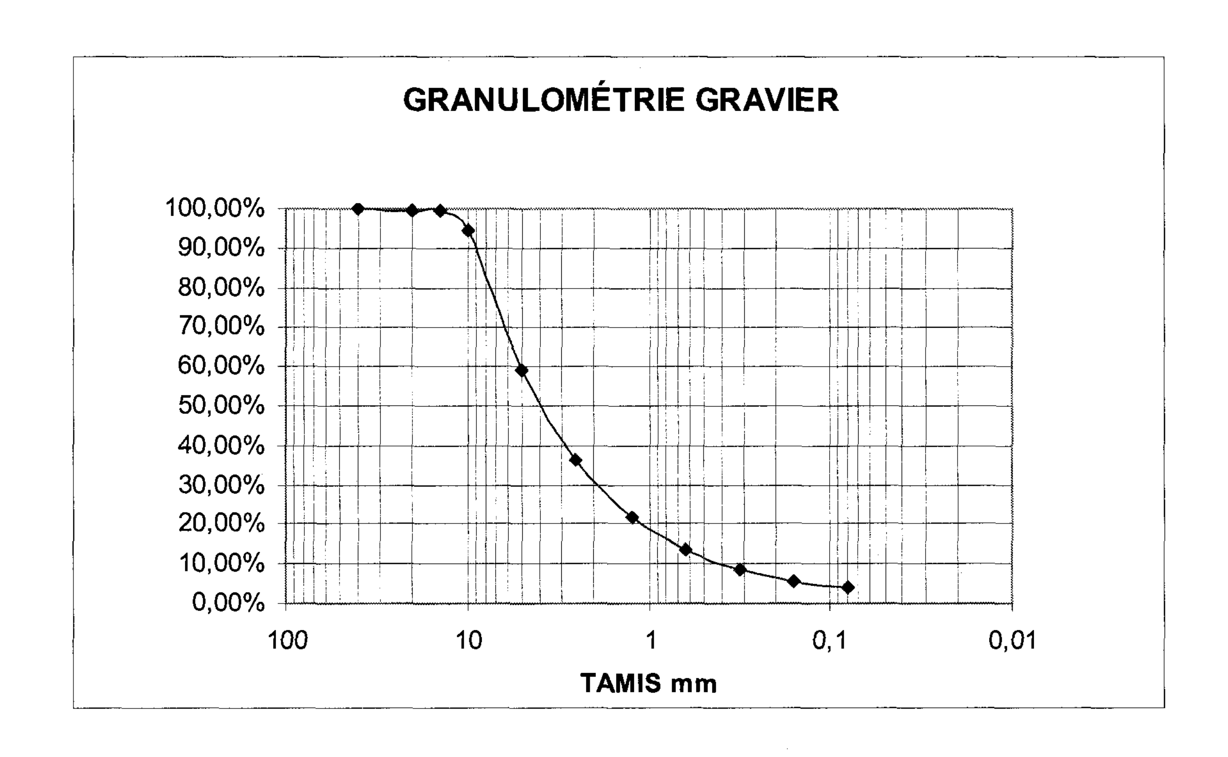
tension_surface = 72;//tension de surface (g/s²) à TPN
angle_contact = 0;//angle de contact """"perfect wetability"""" = 0
rho_eau = 1;//à TPN
g = 980.7;//accélération gravitationnelle à TPN (cm/s²)

a_a = -2.478;//pour du sable, arya et al. 1999
b_a = 1.49;//pour du sable, arya et al. 1999

nombre_part = (3*masse) ./(((4*%pi)*rho_s)*(rayon_part .^3));// [4] nombre de particules
alpha = mtlb_a(a_a,b_a .*log10(masse ./(rayon_part .^3))) ./log10(nombre_part);
rayon_pore = (0.816*rayon_part) .*((indice_des_vides*(nombre_part .^mtlb_s(1,alpha))) .^0.5);
psy_cm = ((2*tension_surface)*cos(angle_contact)) ./((rho_eau*g) .*rayon_pore);
psy_kPa = psy_cm/9.807;

mat = [psy_kPa;teneur_en_eau]'
save('C:\Documents and Settings\Serge-Étienne Parent\My Documents\arya-paris.xls',mat)
```

L. GRANULOMÉTRIE RÉALISÉE SUR LE GRAVIER, LORS DE LA CONSTRUCTION



M. CODE MATLAB POUR LE CALCUL DES LONGUEURS DE TRANSFERT, SELON ROSS (1990)

```
clc
clear
close all

%Données FCH en m/s
Ksat_MRL = 1.5e-4;   %sable
Ksat_CBL = 1.5e-3;  %gravier
q = 1e-9;   %débit d'infiltration
phi = 2.8624*pi()/180; %pente de la CEBC en radians(5%=2,86o)

%Bornes des graphiques (domaine de calcul)
psimin = 1e-3;     kmin = 1e-14;
psimax = 1e4;      kmax = 1e-1;

%Paramètres fichier excel
a_MRL= 0.8353947;         a_CBL= 1.953311458;
n_MRL = 3.5247615;  n_CBL = 4.200142362;
m_MRL = 1-1/n_MRL;         m_CBL = 1-1/n_CBL;
l_MRL = 0.5;               l_CBL = 0.5;

%Courbes FCH
psi = psimin:psimin:psimax;
k_MRL = Ksat_MRL*((1-(a_MRL*psi).^(m_MRL*n_MRL).*(1+(a_MRL*psi).^n_MRL).^(-m_MRL)).^2)...
   ./(1+(a_MRL*psi).^n_MRL).^(m_MRL*l_MRL);
k_CBL = Ksat_CBL*((1-(a_CBL*psi).^(m_CBL*n_CBL).*(1+(a_CBL*psi).^n_CBL).^(-m_CBL)).^2)...
   ./(1+(a_CBL*psi).^n_CBL).^(m_CBL*l_CBL);
figure;
loglog(psi,k_MRL)
hold
loglog(psi,k_CBL)
XLim([psimin psimax])
YLim([kmin kmax])
grid on

%Détermination des bornes d'intégration
p=q/10;
indPsic_CBL = find(q-p < k_CBL & k_CBL < q+p,1,'last');
indPsic_MRL = find(q-p < k_MRL & k_MRL < q+p,1,'first');
Psic_CBL = indPsic_CBL*psimin
Psic_MRL = indPsic_MRL*psimin

%Calcul de l'aire entre k = 0m/s et la FCH entre les bornes
K = @(x)Ksat_MRL*((1-(a_MRL*x).^(m_MRL*n_MRL).*(1+(a_MRL*x).^n_MRL).^(-m_MRL)).^2)...
   ./(1+(a_MRL*x).^n_MRL).^(m_MRL*l_MRL);
Qmax = tan(phi)*quad(K,Psic_CBL,Psic_MRL)/10%Qmax en m^2/s
```

N. RAPPORT DE MODÉLISATION VISUAL HELP

Model : HELP
An US EPA model for predicting landfill hydrologic processes and testing of effectiveness of landfill designs

Author : Benoit Lacroix Vachon
Client : Title Alexandre Cabral
Location : Saint-Tites des Caps

2008-04-15

1. Profile. EPA profile1

Model Settings
[HELP] Case Settings

Parameter	Value	Units
Runoff Method	Model calculated	(-)
Initial Moisture Settings	Model calculated	(-)

[HELP] Surface Water Settings

Parameter	Value	Units
Runoff Area	100	(%%)
Vegetation Class	Good stand of grass	(-)

Profile Structure

Layer	Top (m)	Bottom (m)	Thickness (m)
Loamy Fine Sand	0.0000	-0.6000	0.6000
SPD	-0.5990	-1.1990	0.6000
Sable classe A	-1.1985	-1.4985	0.4000
Gravier	-1.4980	-1.7980	0.2000
Sable ST	-1.7975	-1.8975	0.1000
Municipal Incenerator Fly Ash	-1.8970	-2.4970	0.6000

1.1. Layer. Loamy Fine Sand

Top Slope Length: 30.0000
Bottom Slope Length: 30.0000
Top Slope: 5.0000
Bottom Slope : 5.0000

[HELP] Vertical Perc. Layer Parameters

Parameter	Value	Units
Total porosity	0.453	(vol/vol)
Field capacity	0.19	(vol/vol)
wilting point	0.085	(vol/vol)
sat.hydr.conductivity	7.2E-4	(cm/sec)
subsurface inflow	0	(mm/year)

1.2. Layer. SPD

Top Slope Length: 30.0000
Bottom Slope Length: 30.0000
Top Slope: 5.0000
Bottom Slope : 5.0000

[HELP] Barrier Soil Liner Parameters

Parameter	Value	Units
Total porosity	0.775	(vol/vol)
Field capacity	0.71	(vol/vol)
wilting point	0.231	(vol/vol)
sat.hydr.conductivity	1e-6	(cm/sec)
subsurface inflow	0	(mm/year)

1.3. Layer. Sable classe A
Top Slope Length: 30.0000
Bottom Slope Length: 30.0000
Top Slope: 5.0000
Bottom Slope : 5.0000

[HELP] Lateral Drainage Layer Parameters

Parameter	Value	Units
Total porosity	0.31	(vol/vol)
Field capacity	0.06	(vol/vol)
wilting point	0.04	(vol/vol)
sat.hydr.conductivity	0.015	(cm/sec)
subsurface inflow	0	(mm/year)

1.4. Layer. Gravier
Top Slope Length: 30.0000
Bottom Slope Length: 30.0000
Top Slope: 5.0000
Bottom Slope : 5.0000

[HELP] Lateral Drainage Layer Parameters

Parameter	Value	Units
Total porosity	0.35	(vol/vol)
Field capacity	0.015	(vol/vol)
wilting point	0	(vol/vol)
sat.hydr.conductivity	0.15	(cm/sec)
subsurface inflow	0	(mm/year)

1.5. Layer. Sable ST
Top Slope Length: 30.0000
Bottom Slope Length: 30.0000
Top Slope: 5.0000
Bottom Slope : 5.0000

[HELP] Barrier Soil Liner Parameters

Parameter	Value	Units
Total porosity	0.33	(vol/vol)
Field capacity	0.03	(vol/vol)
wilting point	0	(vol/vol)
sat.hydr.conductivity	7.2e-5	(cm/sec)
subsurface inflow	0	(mm/year)

1.6. Layer. Municipal Incenerator Fly Ash
Top Slope Length: 30.0000
Bottom Slope Length: 30.0000
Top Slope: 5.0000
Bottom Slope : 5.0000

[HELP] Vertical Perc. Layer Parameters

Parameter	Value	Units
Total porosity	0.45	(vol/vol)
Field capacity	0.116	(vol/vol)
wilting point	0.049	(vol/vol)
sat.hydr.conductivity	0.01	(cm/sec)
subsurface inflow	0	(mm/year)

O. POINTS EXPÉRIMENTAUX DE PARENT ET CABRAL 2006

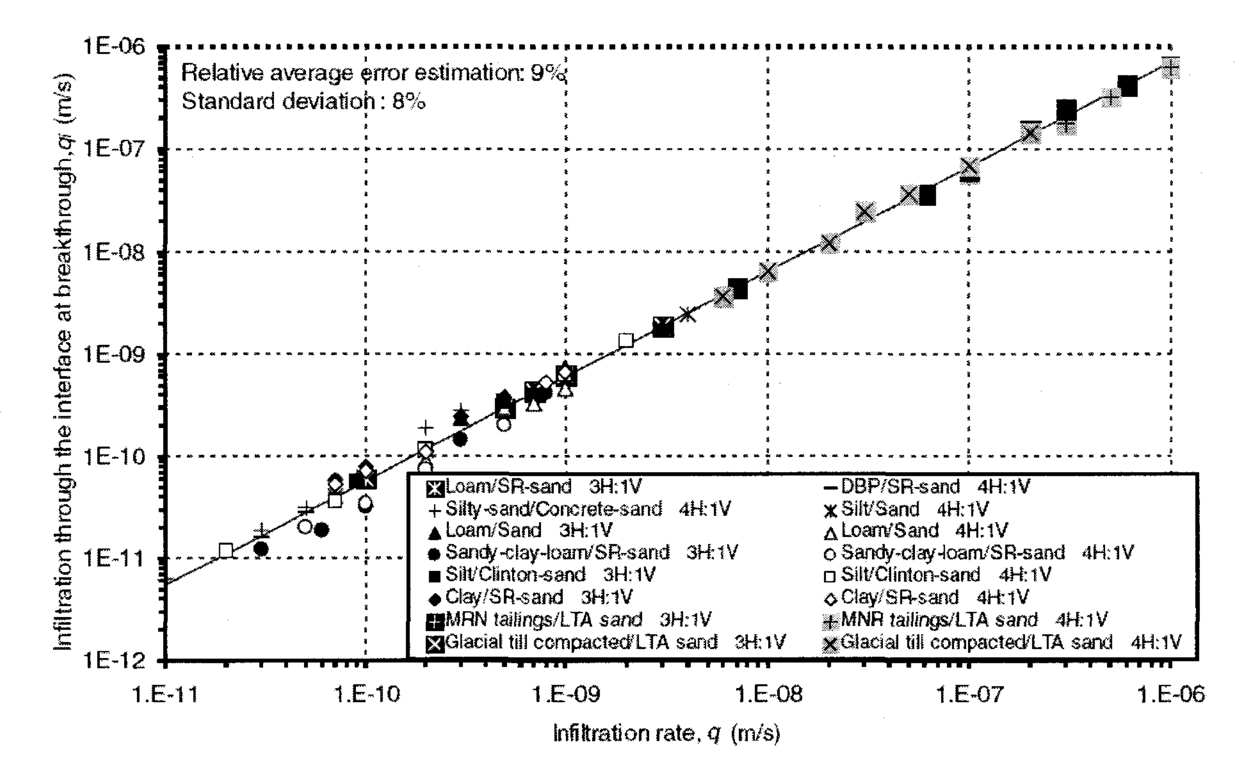


Figure A-3 - Variation du taux d'infiltration à travers l'interface (qi) à la LT, calculé selon Ross (1990) , fonction du taux d'infiltration (q) pour plusieurs combinaisons de matériaux et de pentes